

Оптический журнал

Голография
Holography

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-10-35-47

УДК 535+778.38; 069; 528.7

Контроль качества дифракционной структуры изобразительных голограмм отражательного типа

ЕКАТЕРИНА ВЛАДИМИРОВНА РАБОШ¹✉, НИКОЛАЙ СЕРГЕЕВИЧ БАЛБЕКИН²,
ОЛЬГА ВЛАДИМИРОВНА АНДРЕЕВА³, НИКОЛАЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ПЕТРОВ⁴

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹rabosh.ev7@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-1231-1618>

²nbalbekin@niuitmo.ru <https://orcid.org/0000-0003-0152-6795>

³olga_andreeva@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-3245-0762>

⁴n.petrov@niuitmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-8866-7592>

Аннотация

Предмет исследования. Архивное хранение информации в дифракционной структуре изобразительных голограмм отражательного типа. **Цель работы.** Разработка методики оценки качества дифракционной структуры изобразительных голограмм, регистрируемых по схеме Ю.Н. Денисюка, применительно к решению задачи контроля качества изобразительных голограмм и их дифракционной структуры в процессе эксплуатации и длительного хранения. **Метод.** Обсуждаются методы оценки качества оптического изображения, которые можно использовать для оценки параметров голографического изображения, которое характеризует свойства дифракционной структуры. **Основные результаты.** Рассмотрены различия в формировании дифракционной структуры монохромных и цветных изобразительных голограмм. Экспериментально показано, что, если на голограмму 30×40 см, записанную на высокоразрешающем галогенидосеребряном фотоматериале марки Ultimate 04C, предназначенном для записи полноцветных голограмм, оказывать актиничное излучение в широком диапазоне видимого спектра при величине освещённости не менее 1300 лк в течение 25 тысяч и более часов, то происходит деградация дифракционной структуры голограммы, а именно обнаружено снижение контраста восстановленного голографического изображения на 20%. Проведено количественное сравнение фотографий голографических изображений на основе расчёта усреднённого значения контраста. Авторами статьи подчеркивается важность разработки методов для количественной оценки волнового поля объекта произвольной формы, восстановленного с помощью изобразительных голограмм. Предложено использовать метод фотограмметрии, апробированный коллективом авторов, при характеризации голографических изображений в отсутствие реального объекта. Представлен алгоритм аналого-цифрового преобразования информации, содержащейся в изобразительной голограмме, который применим для контроля изменений параметров голографического изображения как при внешнем воздействии, так и в процессе их хранения. **Практическая значимость.** Методика контроля параметров голографического изображения является необходимым инструментом при решении вопросов архивного хранения голографических изображений в дифракционной структуре изобразительных голограмм отражательного типа. Приведённый в статье алгоритм и оптическая схема его реализации могут быть использованы для оценки качества изобразительной голограммы и её дифракционной структуры в процессе хранения и эксплуатации.

Ключевые слова: изобразительная голография, архивное хранение, дифракционная структура, объектная волна, голографическое изображение, фотограмметрия

Благодарность: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках Государственного задания (Паспорт № 2019–0903). Авторы статьи выражают благодарность М.К. Шевцову за помощь при подготовке статьи и полезные обсуждения.

Ссылка для цитирования: Рабош Е.В., Балбекин Н.С., Андреева О.В., Петров Н.В. Контроль качества дифракционной структуры изобразительных голограмм отражательного типа // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 10. С. 35–47. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-10-35-47>

Коды OCIS: 110.6895, 090.2900, 100.1160, 100.2960, 090.1705, 040.1490.

Quality control of the diffraction structure of display reflection holograms

ЕКАТЕРИНА РАБОШ¹✉, НИКОЛАЙ БАЛБЕКИН², ОЛГА АНДРЕЕВА³, НИКОЛАЙ ПЕТРОВ⁴

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

¹rabosh.ev7@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-1231-1618>

²nbalbekin@niuitmo.ru <https://orcid.org/0000-0003-0152-6795>

³olga_andreeva@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-3245-0762>

⁴n.petrov@niuitmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-8866-7592>

Abstract

Subject of study. An archival storage of information in the diffraction structure of display reflection holograms. **Aim of study.** A development of approaches for assessing the quality of diffraction structure of display holograms recorded according to the scheme of Yu. N. Denisyuk relating to solving the problem of display holograms quality control and their diffraction structure during operation and long-term storage. **Method.** The methods for estimating the quality of an optical image, which can be used in estimating the parameters of a holographic image characterizing the diffraction structure properties, are discussed. **Main results.** The differences in the formation of the diffraction structure of monochrome and color display holograms are considered. It was experimentally shown that if a 30×40 cm hologram recorded on high-resolution Ultimate 04C halide-silver photomaterial for recording the full-color holograms is exposed to actinic radiation in a wide range of visible spectrum at illumination level not less than 1300 lux for 25 thousand and more hours, then the diffraction structure of the hologram degrades, namely the contrast of the reconstructed holographic image is reduced by 20%. A quantitative comparison of photographs of holographic images was carried out based on the calculation of the average contrast value. The authors of the article emphasize the importance of developing the methods for quantifying the wave field of an arbitrary-shaped object reconstructed with display holograms. It is proposed to use the photogrammetry method, tested by a team of authors, when characterizing the holographic images in the absence of a real object. An algorithm for analog-to-digital conversion of information contained in the display hologram applicable to control changes in the parameters of the holographic image both under external influence and during their storage is presented. **Practical Significance.** The technique for controlling the parameters of the holographic image is a necessary tool for solving the issues of archival storage of holographic images in the diffraction structure of the display reflection holograms. The algorithm presented in the article and the optical scheme of its implementation can be used to assess the quality of the display hologram and its diffraction structure during the storage and operation.

Keywords: display holography, archival storage, diffraction structure, object wave, holographic image, photogrammetry

Acknowledgment: the study is funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Passport No. 2019-0903). The authors are grateful to M.K. Shevtsov for his help in preparing the article and for useful discussions.

For citation: Rabosh E.V., Balbekin N.S., Andreeva O.V., Petrov N.V. Quality control of the diffraction structure of display reflection holograms [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 10. P. 35–47. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-10-35-47>

OCIS codes: 110.6895, 090.2900, 100.1160, 100.2960, 090.1705, 040.1490.

1. ВВЕДЕНИЕ

Работы Ю.Н. Денисюка [1, 2] открыли эру трёхмерной голограммии, и с появлением лазеров в арсенале специалистов-оптиков во всём мире не утихает интерес к использованию голограммии в изобразительной технике. Изобразительная голограммия превратилась в самостоятельную область голограммии [3], которая пользуется популярностью и вниманием широкой общественности, о чём свидетельствует большой интерес к выставкам изобразительных голограмм, которые проводятся в разных странах на разных территориях земного шара.

В основе получения большей части аналоговых изобразительных голограмм лежит схема, предложенная Ю.Н. Денисюком [4], для записи трёхмерных голограмм отражательного типа на тонкослойном (толщиной порядка 10 мкм) светочувствительном материале.

Вторая половина XX-го века (60–80-е годы) — время совершенствования технологий получения изобразительных голограмм: улучшение их качества, сохранности и условий эксплуатации. Высококачественные изобразительные голограммы демонстрировались на многочисленных выставках, использовались в качестве музейных экспонатов [5].

В Музее оптики Университета ИТМО [6] такие голограммы как «Бюст А.С. Пушкина», «Братина» и ряд других экземпляров, которые получены в отделе голограммии Государственного оптического института им. С.И. Вавилова (80-е годы XX-го века), являются уникальными как с точки зрения качества голографического изображения, так и с точки зрения размера голографического носителя (120×80 см). Такие голограммы, естественно, были «штучным» товаром и изготавливались в лабораторных условиях в ограниченном количестве экземпляров.

Поэтому очень важным является сохранение качества таких голограмм, обусловленное состоянием их дифракционной структуры.

На протяжении всей истории изобразительной голограммии качество голограмм преимущественно оценивалось визуально [7]. Следует отметить, что для описания качества изображений, получаемых с помощью голограмм в XX-ом веке независимо от типа голо-

грамм, предлагалось использовать методы описания традиционных оптических систем [8]. Такие методы не учитывали специфику голографических изображений, связанную с условиями получения голограмм. Теория связанных волн [9] позволяла установить связь параметров голографического изображения с условиями регистрации трёхмерных голограмм и параметрами регистрирующей среды, но только для голограмм-решёток, полученных при взаимодействии двух плоских волн (тест-объектом является плоское зеркало). Теория связанных волн активно используется специалистами и до настоящего времени, например, при разработке регистрирующих сред и режимов их постэкспозиционной обработки. Достижимые значения дифракционной эффективности изобразительных голограмм, приводимые в публикациях, как правило, получены в экспериментах на тест-объектах. К сожалению, до сих пор не появилось детально разработанной и практически реализуемой методики оценки качества голографических изображений, полученных при использовании объектных волн произвольной формы.

В то же время контроль качества изобразительной голограммы и состояния её дифракционной структуры необходим в процессе её длительного хранения и эксплуатации. Такой контроль и наличие количественных методов измерений параметров дифракционной структуры голограммы, характеризующих изменения этой структуры, особенно важны при разработке условий эксплуатации выставочных экспонатов в музейных коллекциях. Разработка такой методики и её практическая реализация будут востребованы и необходимы при решении вопросов архивного хранения голографических изображений в дифракционной структуре изобразительных голограмм отражательного типа.

Таким образом, целью работы является разработка методики оценки качества дифракционной структуры изобразительных голограмм, регистрируемых по схеме Ю.Н. Денисюка, применительно к решению задачи контроля качества изобразительных голограмм и их дифракционной структуры в процессе эксплуатации и длительного хранения.

2. ДИФРАКЦИОННАЯ СТРУКТУРА ИЗОБРАЗИТЕЛЬНЫХ ГОЛОГРАММ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО ТИПА

Аналоговые изобразительные голограммы получают по схеме Ю.Н. Денисюка [4] на светочувствительном материале, в качестве которого, как правило, используют традиционные фотоматериалы на основе галогенидов серебра [10, 11]. Получение голограмм в этом случае включает два основных этапа. Этап 1 — экспонирование. На данном этапе образуется так называемое «скрытое изображение» дифракционной структуры, которое повторяет структуру воздействующего интерференционного поля. Этап 2 — постэкспозиционная обработка для преобразования скрытого изображения в дифракционную структуру с параметрами, обеспечивающими требуемую эффективность восстанавливаемой объектной волны.

Следует напомнить, что традиционные фотоматериалы, толщина светочувствительного слоя которых около 10 мкм, относят к тонкослойным регистрирующим средам для получения голограмм. Важными параметрами трёхмерных голограмм являются дифракционная эффективность (ДЭ), спектральная селективность $\Delta\lambda$ и угловая селективность $\Delta\Theta$ [4]. Спектральная селективность отражательных голограмм на таких материалах составляет величину порядка 20 нм (частное сообщение М.К. Шевцова), что позволяет восстанавливать объектную волну, освещая голограмму широкополосным источником излучения (белым светом). Для достижения максимальной ДЭ при освещении голограммы должны быть выполнены условия Брэгга [12]. При этом надо иметь в виду следующие обстоятельства: спектральный состав голографического изображения может не совпадать с длиной волны регистрируемого излучения 1 за счёт усадки регистрирующей среды при постэкспозиционной обработке [13]; 2 — для получения высокой ДЭ готовой голограммы её дифракционная структура должна обладать высокой прозрачностью в спектральном интервале длин волн восстанавливаемой объектной волны.

При характеризации свойств дифракционной структуры необходимо отдельно рассматривать монохромные изобразительные голограммы и цветные изобразительные голограммы (записанные двумя и более длинами волн излучения из разных областей видимого спектра).

2.1. Монокромные голограммы

История изобразительных голограмм началась (и продолжается до сих пор) с монохромных голограмм, записываемых при использовании лазеров с длиной волны излучения в красной области спектра. Технологический режим постэкспозиционной обработки, разработанный для таких голограмм, формирует дифракционную структуру в виде компактных частиц металлического серебра сферической формы [14], так называемых коллоидных частиц серебра, средний размер которых составляет 20–30 нм [15]. Среда, содержащая такие частицы, имеет полосу поглощения в коротковолновой области спектра и высокую прозрачность в длинноволновой области видимого спектра. Это позволяет получать голограммы с высокой эффективностью в жёлто-оранжевой спектральной области ($\lambda > 550$ нм). Монокромные изобразительные голограммы, полученные по технологии, разработанной в ГОИ им. С.И. Вавилова (1967–1992 гг.), до настоящего времени сохраняют свои изобразительные свойства (по результатам визуального осмотра). Выставочные экземпляры широкоформатных голограмм, полученные в 80-х годах XX-го века, с точки зрения наблюдателя также не потеряли своего качества.

Количественные измерения параметров трёхмерных голограмм-решёток, сформированных частицами коллоидного серебра в серебросодержащих нанопористых матрицах показали неизменность структуры таких голограмм при их хранении в течение 30 лет [16].

Предполагается, что сохранность дифракционной структуры таких голограмм в течение длительного времени обеспечивается тем, что в процессе постэкспозиционной обработки и образования проявленных частиц коллоидного серебра вокруг частиц формируется защитная оболочка из желатината серебра. Наличие такой оболочки наблюдали при исследовании с помощью электронной микроскопии (ЭМ) сотрудники МИРЭА в 1980-х годах (частное сообщение Н.П. Танетовой).

Следует отметить, что визуальный осмотр даёт субъективную оценку стабильности качества изобразительных голограмм в течение длительного времени их активного использования, но не может быть применён для исследования влияния внешних условий (освещения, температуры, влажности) на параметры

дифракционной структуры и изменение качества восстановленного голограммического изображения.

Для исследования влияния внешних факторов на дифракционную структуру полимерных регистрирующих сред был разработан метод голограммической релаксационной спектроскопии или релаксометрии [17]. Однако этот метод не может быть использован при исследовании галогенидосеребряных регистрирующих сред.

Также следует отметить, что технологический процесс постэкспозиционной обработки, разработанный для получения высокоеффективных монохромных голограмм, которые формируют изображение в длинноволновой области видимого спектра, не может быть использован для получения цветных голограмм, которые формируют восстановленное изображение на разных участках видимого спектра. Это обусловлено оптическими свойствами дифракционной структуры, состоящей из коллоидных частиц серебра, так как спектр поглощения таких частиц носит ярко выраженный селективный характер с максимумом поглощения в коротковолновой области спектра (400–420 нм), что приводит к очень низкой эффективности дифракции в сине-зелёной области [14].

2.2. Цветные голограммы

Для получения цветных голограмм на традиционных галогенидосеребряных фотоматериалах используют режим постэкспозиционной обработки, который формирует дифракционную структуру в виде частиц, состоящих из солей серебра, прозрачных во всей видимой области спектра.

Многочисленные выставочные экземпляры цветных голограмм демонстрируют высокую эффективность голограммических изображений цветных объектов в широком диапазоне видимого спектра. Однако вследствие практически ежедневного экспонирования цветных голограмм в Музее оптики (более 25 тыс. часов, начиная с 2009 г.) осветительными широкополосными приборами при величине освещённости в диапазоне от 1000 до 1500 лк отмечено ослабление яркости цветных компонент и общей яркости восстанавливаемого изображения на ряде голограмм (эмульсия Ultimate Holography 04 нм (Ultimate 04C) при записи на длинах волн 457, 532 и 640 нм [18]).

На рис. 1 приведены фотографии двух цветных голограмм из коллекции под названием «Бабочки», созданной художником-голографистом Ивом Женте. Обе голограммы были изготовлены в течение 2003 г. в лаборатории голографии с использованием фотоэмulsionии Ultimate 04C и с помощью одинаковой оптической установки для записи цветных голограмм (г. Бордо, Франция). Эти же голограммы были сфотографированы нами в одинаковых условиях в декабре 2022 г. с помощью цифрового фотоаппарата Nikon D3000 в формате необработанных данных (NEF-формат для марки Nikon). В качестве источника излучения для освещения голограмм использовался широкополосный светодиод, созданный специально для восстановления полноцветных голограммических изображений (источник располагается относительно голограммы так же, как располагался опорный источник при экспонировании голограммы; угол под которым восстанавливаются данные цветные голограммические изображения, составляет 34°). Экземпляр № 1 (рис. 1а) демонстрируется в Музее оптики с 2009 г., экземпляр № 2 (рис. 1б) находится в частной коллекции.

В данном исследовании была проведена оценка изображений голограмм, представленных на рис. 1. Наблюдения показали, что для голограммы № 1 характерно снижение контраста по сравнению с образцом № 2. Необходимо провести количественный анализ величины контраста изображений, зарегистрированных на фотографиях обеих голограмм в идентичных условиях. Для этого опишем подробнее объекты, записанные на голограммы, и выберем подходящие для оценки величины контраста фрагменты фотографий голограмм. На голограммах записаны изображения бабочек и жуков. Структурная окраска крыльев бабочек зависит от направления освещения, а цвета чешуек обусловлены наличием фотонных структур [19]. Бабочки, изображения которых записаны на голограммы, относятся к разным видам, поэтому для сравнения качества обеих голограмм цветные фрагменты изображений крыльев бабочек не использовались. Кроме того, у разных видов бабочек крылья обладают различной прозрачностью. Это хорошо видно на теневых участках объектов на фотографиях голограмм (рис. 2а и 2б): для голограммы № 1 наиболее непрозрачные



Рис. 1. Фотографии hologрамм «Бабочки» (цветные). Голограмма № 1, музейный экспонат (а); голограмма № 2 из частной коллекции (б)

Fig. 1. Photographs of the Butterflies holograms. The hologram № 1, museum exhibit (a), the hologram №2 from a private collection (b)

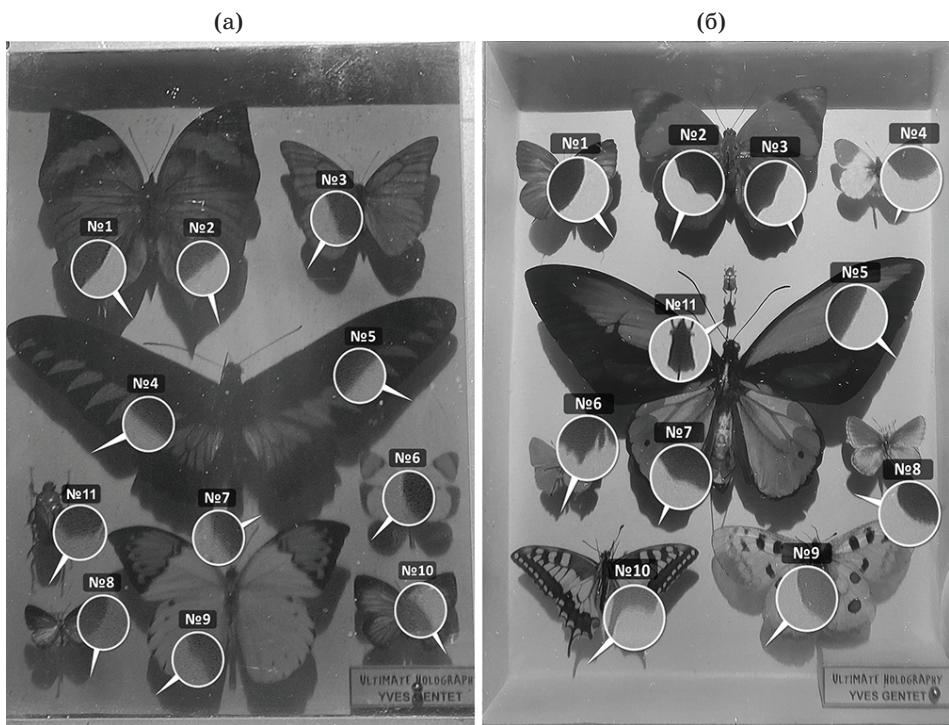


Рис. 2. Пронумерованные теневые участки бабочек и жуков на чёрно-белых фотографиях голограмм. Голограмма № 1, музейный экспонат (а); голограмма № 2 из частной коллекции (б)

Fig. 2. Numbered shadow patches of butterflies and beetles in black and white photographs of holograms. The hologram № 1, museum exhibit (a), the hologram № 2 from a private collection (b)

участки — № 1, 3 и 6, наименее непрозрачные — № 7–10. Для голограммы № 2 наиболее непрозрачные участки — № 1, 2, 3 и 8, наименее непрозрачные — № 6, 9 и 10. Поэтому тени не использовались при оценке величины контраста. Однако на крыльях некоторых бабочек присутствуют чёрные элементы, так называемые *dark zones* [19]. Именно эти фрагменты с чёрными элементами будут рассмотрены при оценке контраста.

Проведём оценку величины контраста для некоторых бабочек, крылья которых содержат чёрные элементы. На рис. 1а нами была определена центральная бабочка, относящаяся к виду *Trogonoptera brookiana* [20]. Согласно описанию данного вида, основная часть чешуек крыльев имеет чёрный цвет с зелёными вставками¹. На фотографии голограммы из частной коллекции (рис. 1б) была идентифицирована центральная бабочка, относящаяся к виду *Ornithoptera Croesus* [21]. Для крыльев самцов данного вида бабочек характерен преимущественно оранжевый или золотистый цвет с чёрными вставками². Далее были выбраны фрагменты крыльев, обозначенных выше объектов, на фотографиях в чёрно-белом формате (рис. 3а и 3б), соответствующие чёрному цвету крыльев на границе с белым фоном. Каждый фрагмент был обработан в среде MATLAB следующим образом: получены массивы данных, представляющих собой отклик пикселя в градациях серого в отн. ед. как внутри каждой области, соответствующей тени, так и внутри области, соответствующей белому фону (фон для обеих голограмм одинаков и представляет собой белую коробку, собранную специально для записи фона голограмм объектов). Далее были определены минимальные и максимальные значения отклика пикселя I для каждого из фрагментов. Границный контраст C рассчитывался по следующей формуле:

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}}. \quad (1)$$

Рассчитанные значения граничного контраста C для фрагментов крыльев с чёрными

¹ <https://lepidopterolog.ru/papilionidae/papilioninae/trogonoptera-brookiana>

² <https://lepidopterolog.ru/papilionidae/papilioninae/ornithoptera-croesus>

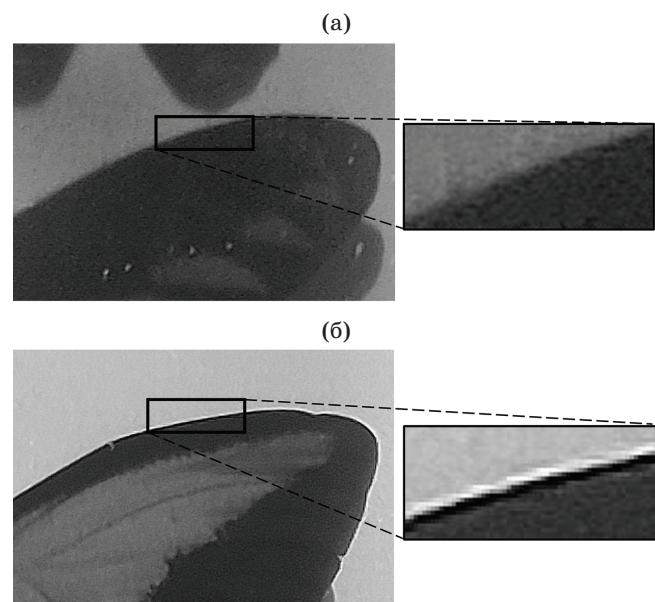


Рис. 3. Фрагментарные изображения крыльев центральных бабочек, общий вид которых представлен на рис. 2а и 2б, соответственно

Fig. 3. Image fragments of the wings of central butterflies from general view of Fig. 2a and 2b, respectively

Таблица 1. Величины отклика пикселя в градациях серого и контраст C голограммических изображений выбранных крыльев бабочек

Table 1. Grayscale pixel response magnitudes and contrast C of holographic images of selected butterfly wings

№ голограммы	Отклик пикселя I , отн. ед.		C , отн. ед.
	min	max	
№ 1	26	129	0,79
№ 2	2	240	0,99

элементами приведены в табл. 1. Таким образом, можно сформулировать промежуточный итог: контраст голограммического изображения голограммы № 1, которая находится под постоянным освещением в Музее оптики, на 20% ниже контраста голограммического изображения голограммы № 2.

Для оценки контраста изображений целесообразным оказалось также использование теней изображений жуков, поскольку они не пропускают свет (рис. 2а и 2б, фрагменты теней № 11 могут быть между собой сравнены). Оценка величины контраста фотографий восстановленных голограммических изображений

для выбранных фрагментов (тени жуков) производится в несколько этапов (рис. 4а и 4б):

1. Разбиение изображений на три цветовых канала (красный, зелёный, синий). Для выполнения этого пункта желательно произвести измерения спектральных характеристик отдельных цветовых каналов матричного фотоприёмника, а именно, измерение спектрального отклика матрицы [22], однако, в данной работе при фотографировании использовалась одна и та же цифровая камера Nikon D3000.

2. Преобразование изображений, соответствующих своему цветовому каналу в чёрно-белый формат.

3. Обработка каждого полученного изображения в среде MATLAB.

Для расчёта контраста также применялась формула (1). Рассчитанные значения граничного контраста C для теневых участков жуков приведены в табл. 2. В последнем столбце для обеих голограмм приведена общая величина контраста по трём каналам. Полученные результаты также свидетельствуют о снижении контраста голографического изображения полноцветной голограммы № 1 на 20% по сравнению с величиной контраста голограммы № 2.

Таким образом, результаты оценки контраста согласуются с выводом о качестве голограмм, основанным на визуальной оценке, и обозначают тенденцию к ухудшению дифракционной структуры цветной голограммы.

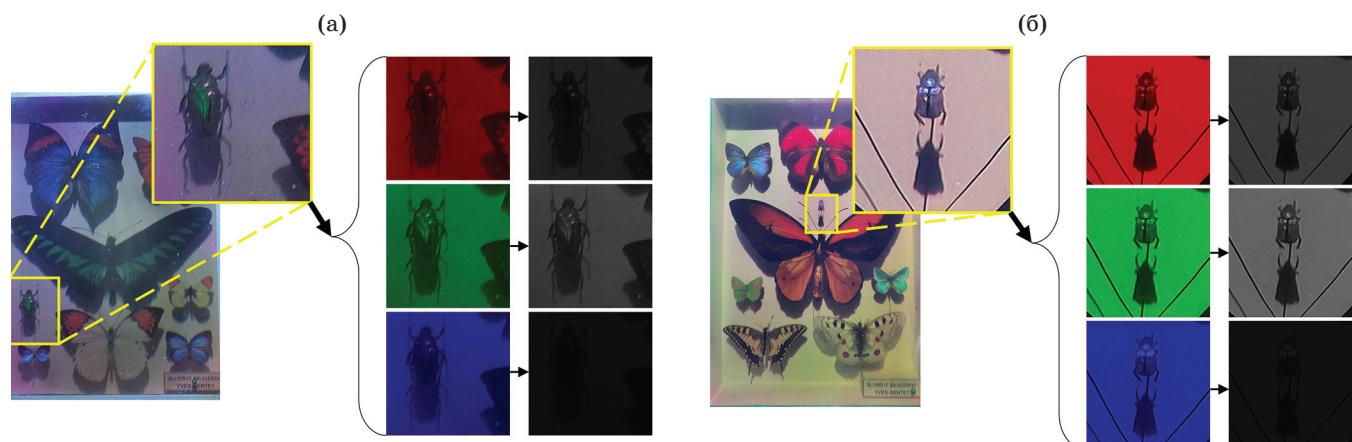


Рис. 4. Выбранные объекты для расчёта величины контраста и увеличенные изображения объекта в трёх цветовых каналах RGB. Голограмма № 1, музейный экспонат (а); голограмма № 2 из частной коллекции (б)

Fig. 4. Selected objects for calculating the contrast value, enlarged images of the object in three RGB color channels. The hologram № 1, museum exhibit (a), the hologram № 2 from a private collection (b)

Таблица 2. Величины отклика пикселя в градациях серого и контраст C для теневого участка выбранного объекта по трём каналам RGB

Table 2. Pixel response values in grayscale and contrast C for the shadow area of the selected object using three RGB channels

№ голограммы	№ участка	Отклик пикселя I , отн. ед.		С, отн. ед.	
		min	max	C	C_{Σ}
№ 1	Красный	10	35	0,70	
	Зелёный	20	67	0,90	0,60
	Синий	9	15	0,40	
№ 2	Красный	44	196	0,90	
	Зелёный	33	197	0,80	0,80
	Синий	31	197	0,60	

Ухудшение качества изображения цветных голограмм обусловлено деградацией дифракционной структуры в результате воздействия излучения на содержащиеся в ней соли серебра. О влиянии освещения на результат химико-фотографического процесса, с помощью которого получают цветное голографическое изображение, известно давно [23]. Однако до сих пор не существует методов, которые позволяли бы контролировать этот процесс и препятствовать деградации дифракционной структуры.

Как показывает сегодняшняя ситуация, проблема сохранности дифракционной структуры музеиных экспонатов цветных голограмм стоит достаточно остро, и для её решения требуется научный подход с проведением исследований влияния внешних факторов на свойства дифракционной структуры. Таким образом, имеет место разработка методики характеризации восстановленной объектной волны и контроля стабильности параметров дифракционной структуры для цветных голограмм.

3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ

Технология получения изобразительных голограмм представляет собой технологию сохранения информации об объекте, хранящейся в её дифракционной структуре. Основными сферами такого использования голограмм являются следующие направления:

1. Изобразительная техника оптического копирования объектов культурного наследия: изобразительная голограмма представляет собой оптическую копию объекта и способствует сохранению оригинала — объекта культурного наследия.

2. Хранение интерферометрически точной визуальной информации, с помощью которой можно восстановить изображение утраченного объекта.

3. Изобразительная голограмма как объект научно-технологических достижений в области голографии.

Качество голографического изображения свидетельствует о сохранности информации об объекте в дифракционной структуре. Для оценки изображения в работах [24–26] предложен подход, основанный на использовании метода фотограмметрии. Фотограмметрия позволяет

осуществить оцифровку волновых фронтов сложной формы по фотограмметрическим ракурсам, формирующимся на этапе восстановления голографического изображения. Проведена экспериментальная реализация с целью оптической консервации тест-объекта и дальнейшей возможностью цифрового восстановления и последующей обработки этой информации. В работе [24] впервые предложено использовать фотограмметрический подход, а работа [25] содержит дискуссию о перспективах применения техники изобразительной голографии для задач архивного и оперативного хранения информации, а также о перспективах развития методов аналого-цифрового преобразования информации, содержащейся в изобразительных голограммах. О применении фотограмметрии для задачи оцифровки ракурсов восстановленного голографического изображения и количественных результатах сообщается в [26], где для оценки сходства виртуальной копии объекта из голограммы (сравниваемая модель) относительно виртуальной копии объекта (представляет собой эталонную модель) выполнялся расчёт стандартного отклонения σ . Поскольку каждая модель представляет собой плотное облако точек, то при их наложении друг на друга в общей системе координат в специальном программном пакете для обработки трёхмерных моделей удобно оценить максимальное отклонение между точками сравниваемой и эталонной моделей по следующей формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \mu)^2}{n}}, \quad (2)$$

где μ представляет собой среднее арифметическое набора расстояний между точками облака, e_i — величина отдельного значения выборки, n — общее число точек облака, учитываемых при расчёте.

Ранее, в работах [24–26] для оценки эффективности предложенной методики аналого-цифрового фотограмметрического преобразования информации, записанной в голограммах отражательного типа, использовалось сравнение трёхмерных моделей, полученных при фотограмметрической оцифровке изображений реального тест-объекта и восстановленного трёхмерного изображения, записанного

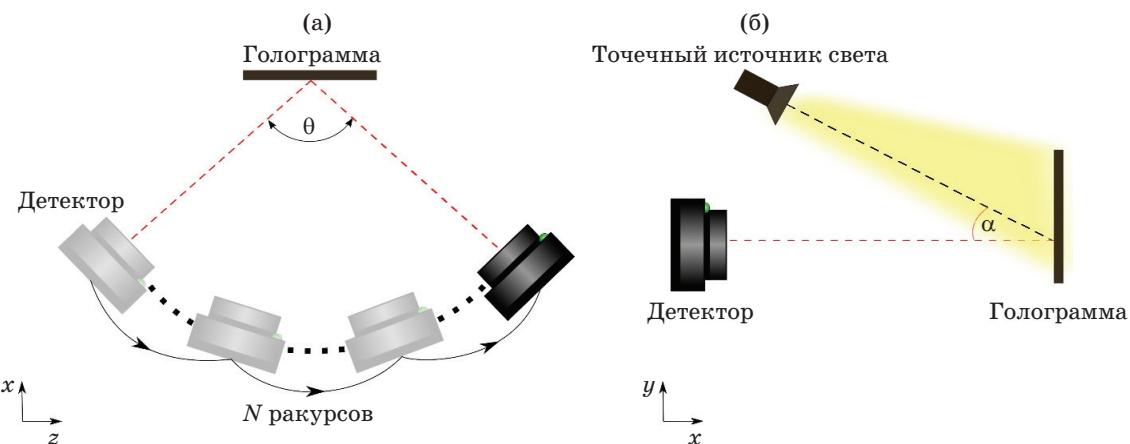


Рис. 5. Схема экспериментальной установки получения оцифрованных голографических изображений, восстановленных аналоговыми голограммами. θ — угол обзора голографического изображения, α — угол падения опорной волны. Вид сверху (а) и вид сбоку (б)

Fig. 5. Scheme of the experimental setup for obtaining digitized holographic images reconstructed by analog holograms. θ is the viewing angle of the holographic image, and α is the reference beam angle. Top view (a) and side view (b)

на голограмму. Поскольку целью настоящей работы является оценка качества дифракционной структуры голограммы независимо от физического существования объекта голографирования, предлагается проводить сравнение двух фотографий голографических изображений, зарегистрированных в разные моменты времени t (от нескольких дней до нескольких месяцев). При этом в промежутке между t_1 и t_2 голограмма может подвергаться воздействию излучения, используемого для восстановления голографического изображения. Алгоритм проведения такого сравнения при использовании экспериментальной установки (рис. 5) может быть следующий:

1. Получение набора фотоснимков разных ракурсов голографического изображения в момент времени t_1 .
2. Построение трёхмерной модели объекта (1).
3. Получение набора фотоснимков разных ракурсов голографического изображения в момент времени t_2 .
4. Построение трёхмерной модели объекта (2).
5. Проведение сравнения по заданным (выбранным) параметрам голографических изображений. Например, сопоставление цвета, карта глубин, определение геометрических размеров.

При отработке методики исследования конкретной голограммы с использованием данного алгоритма необходимо выполнить следующие мероприятия:

1. Выбрать фрагмент голографического изображения объекта для проведения оцифровки.
2. Определить угол и параметры освещющей волны, а также, при каких значениях параметров не происходит искажений изображения.

Процедура фотограмметрической оцифровки волны, восстановленной изобразительной голограммой, с целью аналого-цифрового преобразования информации, содержащейся в изобразительных голограммах, была апробирована в работах [24, 26], что позволяет утверждать, что разработка на её основе методики может быть реализована в обозримом будущем. Это даёт перспективу для развития данной методики применительно к оценке изменений качества голограмм во времени (или при внешнем воздействии) при использовании фрагмента голографического изображения, удобного для практической реализации и проведения расчётов, в отсутствие самого объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопросы архивного хранения информации в дифракционной структуре голограммы неотделимы от вопроса архивного хранения самой

голограммы, представляющей собой объект многоступенчатого научно-технологического процесса и результат разработки междисциплинарных комплексных технологических решений. Ключевым моментом в данном вопросе является контроль качества голограммы в процессе её хранения независимо от её дальнейшего использования в качестве музеиного экспоната или для долговременного хранения информации об объекте.

В настоящее время развитие цифровых методов даёт возможность производить аналого-цифровое преобразование информации, позволяющее количественно охарактеризовать волновой фронт объектной волны произвольной формы. В дальнейшем, методика, разработанная на основе метода фотограмметрии,

будет использована для характеризации качества одного и того же голографического изображения путём оцифровки волнового фронта объектной волны и последующего сравнения с волновым фронтом восстановленной объектной волны в разные моменты времени. Подразумевается, что с течением экспериментально установленного времени применение методики позволит выявить изменения в дифракционной структуре и описать природу этих изменений. Приведённый в статье алгоритм может быть использован для оценки качества изобразительной голограммы и её дифракционной структуры в процессе хранения и эксплуатации при отсутствии реального объекта, чей волновой фронт был записан на голограмму.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Денисюк Ю.Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // Доклады Академии наук. Российская академия наук. 1962. Т. 144. № 6. С. 1275–1278.
2. Денисюк Ю.Н., Протас И.Р. Усовершенствованные липпмановские фотографические пластиинки для регистрации стоячих световых волн // Оптика и спектроскопия. 1963. Т. 14. № 5. С. 725–728.
3. Колфилд Г. Оптическая голография. М.: Мир, 1982. Т. 2. 736 с.
4. ГОСТ Р 59321.2–2021 “Оптика и фотоника. Голография. Часть 2. Голография аналоговая. Термины и определения”. [Электронный ресурс URL]. Режим доступа: <https://protect.gost.ru/document1.aspx?control=31&baseC=6&page=2&month=11&year=2021&search=&id=241508>, свободный, Яз. рус. (дата обращения 25.03.23).
5. Женте И., Шевцов М.К. Мобильная голографическая камера для записи цветных голограмм // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 7. С. 30–33.
6. Сайт Музея оптики. [Электронный ресурс URL]. Режим доступа: <https://optimus.itmo.ru/>, свободный, Яз. рус. (дата обращения 25.03.23).
7. Денисюк Ю.Н. Сборник избранных статей по голографии // Труды ГОИ. 1988. Т. 68. Вып. 202. С. 265.
8. Колфилд Г. Оптическая голография. М.: Мир, 1982. Т. 1. Гл. 2. С. 26–138.
9. Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings // The bell system technical journal. 1969. V. 48. № 9. P. 2909–2947.
10. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 672 с.
11. Кириллов Н.И. Высокоразрешающие фотоматериалы для голографии и процессы их обработки. М.: Наука, 1979. С. 16–24.
12. Захаров Ю.Н. Восстановление псевдоцветных изображений при монохромной записи голограмм Денисюка // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 7. С. 96–99.
1. Denisyuk Yu.N. On the mapping of the optical properties of an object in the wave field of radiation scattered by it // Doklady Akademii Nauk SSSR. 1962. V. 144. № 6. P. 1275–1278.
2. Denisyuk Y.N., Protas I.R. Improved lippman photographic plates for recording stationary light waves [in Russian] // Optics and Spectroscopy. 1963. V. 14. P. 381.
3. Caulfield H.J. Handbook of optical holography. New York: Academic Press, 1979. V. 2. 639 p.
4. GOST R 59321.2-2021 “Optics and photonics. Holography. Part 2. Analog holography. Terms and definitions”. URL: <https://protect.gost.ru/document1.aspx?control=31&baseC=6&page=2&month=11&year=2021&search=&id=241508> [in Russian]. (Last accessed Mar. 25, 2023).
5. Gentet Y., Shevtsov M.K. Mobile holographic camera for recording color holograms [in Russian] // Journal of Optical Technology. 2009. V. 76. № 7. P. 399–401. <https://doi.org/10.1364/JOT.76.000399>
6. Optical Museum. St. Petersburg. URL: <https://optimus.itmo.ru/>. [in Russian]. (Last accessed Mar. 25, 2023).
7. Denisyuk Y.N. Collection of selected articles on holography [in Russian] // Proceedings of the Vavilov State Optical Institute. 1988. V. 68. № 202. P. 265.
8. Caulfield H.J. Handbook of optical holography. New York: Academic Press, 1979. V. 1. № 2. 639 p.
9. Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings // The bell system technical journal. 1969. V. 48. № 9. P. 2909–2947.
10. Collier R., Burkhardt C.B., Lin L.H. Optical holography. The MIT Press, 1971. 624 p.
11. Kirillov N.I. High-resolution photographic materials for holography and methods of processing them [in Russian]. Moscow: Izdatel Nauka, 1979. P. 16–24.
12. Zakharov Y.N. Reconstructing pseudo-color images when Denisyuk holograms are recorded monochromatically // Journal of Optical Technology. 2009. V. 76. № 7. P. 449–451. <https://doi.org/10.1364/JOT.76.000449>

13. Марков В.Б., Хижняк А.И. Спектрально-угловая селективность отражающих голограмм // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. № 9. С. 18–23.
14. Андреева О.В., Андреева Н.В., Кузьмина Т.Б. Плазмонные частицы коллоидного серебра в высокоразрешающих регистрирующих средах // Оптика и спектроскопия. 2017. Т. 122. № 1. С. 58–65. <https://doi.org/10.7868/S0030403417010020>
15. Усанов Ю.Е., Кособокова Н.Л., Тихомиров Г.П. Исследование зависимости дифракционной эффективности голограмм от размеров проявленных частиц серебра // Опт.-мех. пром. 1977. № 3. С. 15–18.
16. Андреева О.В., Быков Е.П., Исмагилов А.О., Pandya A., Щелканова И.Ю., Андреева Н.В. Нанопористые силикатные матрицы для голограммии и биомедицины // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129. № 4. С. 418–426. <https://doi.org/10.21883/OS.2021.04.50769.309-20>
17. Вениаминов А.В., Лашков Г.И., Ратнер О.Б., Шелехов Н.С., Бандюк О.В. Голограммическая релаксометрия как метод исследования диффузионных процессов в полимерных регистрирующих средах // Оптика и спектроскопия. 1986. Т. 60. № 1. С. 142–147.
18. Gentet P., Gentet Y., Lee S.H. Ultimate 04 the new reference for ultra-realistic color holography // 2017 International Conference on Emerging Trends & Innovation in ICT (ICEI). 2017. P. 162–166. <https://doi.org/10.1109/ETIIC.2017.7977030>
19. Biro L.P., Vigneron J.P. Photonic nanoarchitectures in butterflies and beetles: valuable sources for bioinspiration // Laser & Photonics Reviews. 2011. V. 5. № 1. P. 27–51. <https://doi.org/10.1002/lpor.200900018>
20. Han Z., Niu S., Shang C., Liu Z., Ren L. Light trapping structures in wing scales of butterfly Tropionoptera brookiana // Nanoscale. 2012. V. 4. № 9. P. 2879–2883. <https://doi.org/10.1039/C2NR12059C>
21. Wilts B.D., Matsushita A., Arikawa K., Stavenga D.G. Spectrally tuned structural and pigmentary coloration of birdwing butterfly wing scales // Journal of the Royal Society Interface. 2015. V. 12. № 111. P. 20150717. <https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0717>
22. Лесничий В.В., Петров Н.В., Черёмхин П.А. Методика измерения спектральных характеристик матричных приемников любительских и профессиональных фотокамер и их применение для задач цифровой голограммии // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 115. № 4. С. 633–633. <https://doi.org/10.7868/S0030403413100097>
23. Джеймс Т. Теория фотографического процесса. Л.: Химия, 1973. Т. 6. 576 с.
24. Рабош Е.В., Анкушин Д.А., Балбекин Н.С., Вавилова Ю.А., Тимошенкова А.М., Авдонина Е.С., Шлыкова Т.В., Петров Н.В. Построение 3D модели изображения объемной отражательной голограммы методом фотограмметрии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 6. С. 1013–1021. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-6-1013-1021>
25. Rabosh E.V., Balbekin N.S., Petrov N.V. Analog-to-digital conversion of information archived in display holograms: I. discussion // J. Opt. Soc. Am. A. 2023. V. 40. № 4. P. B47–B56. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.478498>
26. Rabosh E.V., Balbekin N.S., Timoshenkova A.M., Shlykova T.V., Petrov N.V. Analog-to-digital conversion of information archived in display holograms: II. photogrammetric digitization // J. Opt. Soc. Am. A. 2023. V. 40. № 4. P. B57–B64. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.478499>
13. Markov V.B., Khizhnyak A.I. Spectral-angular selectivity of reflection holograms [in Russian] // Technical Physics Letters. 1996. V. 22. № 9. P. 18–23.
14. Andreeva O.V., Andreeva N.V., Kuzmina T.B. Plasmonic particles of colloidal silver in high-resolution recording media // Optics and Spectroscopy. 2017. V. 122. № 1. P. 52–58. <https://doi.org/10.1134/S0030400X17010027>
15. Usanov Y.E., Kosobokova N.L., Tikhomirov G.P. Study of the dependence of the diffraction efficiency of holograms on the sizes of developed silver particles [in Russian] // Optical-mechanical industry. 1977. № 3. P. 15–18.
16. Andreeva O.V., Bykov E.P., Ismagilov A.O., Pandya A., Shchelkanova I.Yu., Andreeva N.V. Nanoporous silicate matrices for holography and biomedicine // Optics and Spectroscopy. 2021. V. 129. № 4. P. 431–439. <https://doi.org/10.1134/S0030400X21040044>
17. Veniaminov A.V., Lashkov G.I., Ratner O.B., Shelekhov N.S., Bandyuk O.V. Holographic relaxometry as a method of studying diffusion processes in polymer recording media [in Russian] // Optics and Spectroscopy. 1986. V. 60. № 1. P. 87–91.
18. Gentet P., Gentet Y., Lee S.H. Ultimate 04 the new reference for ultra-realistic color holography // 2017 International Conference on Emerging Trends & Innovation in ICT (ICEI). 2017. P. 162–166. <https://doi.org/10.1109/ETIIC.2017.7977030>
19. Biro L.P., Vigneron J.P. Photonic nanoarchitectures in butterflies and beetles: valuable sources for bioinspiration // Laser & Photonics Reviews. 2011. V. 5. № 1. P. 27–51. <https://doi.org/10.1002/lpor.200900018>
20. Han Z., Niu S., Shang C., Liu Z., Ren L. Light trapping structures in wing scales of butterfly Tropionoptera brookiana // Nanoscale. 2012. V. 4. № 9. P. 2879–2883. <https://doi.org/10.1039/C2NR12059C>
21. Wilts B.D., Matsushita A., Arikawa K., Stavenga D.G. Spectrally tuned structural and pigmentary coloration of birdwing butterfly wing scales // Journal of the Royal Society Interface. 2015. V. 12. № 111. P. 20150717. <https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0717>
22. Lesnichii V.V., Petrov N.V., Cheremkhin P.A. A technique of measuring spectral characteristics of detector arrays in amateur and professional photocameras and their application for problems of digital holography // Optics and Spectroscopy. 2013. V. 115. C. 557–566. <https://doi.org/10.1134/S0030400X13100093>
23. James T.H. The theory of the photographic process. New York: Macmillan, 1966. V. 6. 576 p.
24. Rabosh E.V., Ankushin D.A., Balbekin N.S., Vavilova Yu.A., Timoshenkova A.M., Avdonina E.S., Shlykova T.V., Petrov N.V. Three-dimensional simulation of volume pictorial hologram by photogrammetry method [in Russian] // Sci. Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt. 2019. V. 19. № 6. P. 1013–1021. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-6-1013-1021>
25. Rabosh E.V., Balbekin N.S., Petrov N.V. Analog-to-digital conversion of information archived in display holograms: I. discussion // J. Opt. Soc. Am. A. 2023. V. 40. № 4. P. B47–B56. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.478498>
26. Rabosh E.V., Balbekin N.S., Timoshenkova A.M., Shlykova T.V., Petrov N.V. Analog-to-digital conversion of information archived in display holograms: II. Photogrammetric digitization // J. Opt. Soc. Am. A. 2023. V. 40. № 4. P. B57–B64. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.478499>

АВТОРЫ

Екатерина Владимировна Рабош — инженер, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57742582400, <https://orcid.org/0000-0003-1231-1618>, rabosh.ev7@gmail.com

Николай Сергеевич Балбекин — канд. физ.-мат. наук, инженер, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 55782919700, <https://orcid.org/0000-0003-0152-6795>, nbalbekin@niuitmo.ru

Ольга Владимировна Андреева — доктор техн. наук, доцент, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 7006390263, <https://orcid.org/0000-0003-3245-0762>, olga_andreeva@mail.ru

Николай Владимирович Петров — доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 7202910606, <https://orcid.org/0000-0002-8866-7592>, n.petrov@niuitmo.ru

Статья поступила в редакцию 20.12.2022
Одобрена после рецензирования 30.05.2023
Принята к печати 18.08.2023

AUTHORS

Ekaterina V. Rabosh — Engineer, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57742582400, <https://orcid.org/0000-0003-1231-1618>, rabosh.ev7@gmail.com

Nikolay S. Balbekin — PhD in Physics and Mathematics, Engineer, Head of the Laboratory, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 55782919700, <https://orcid.org/0000-0003-0152-6795>, nbalbekin@niuitmo.ru

Olga V. Andreeva — Dr.Sc., Associate Professor, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 7006390263, <https://orcid.org/0000-0003-3245-0762>, olga_andreeva@mail.ru

Nikolay V. Petrov — Dr.Sci. in Physics and Mathematics, Professor, Head of the Laboratory, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 7202910606, <https://orcid.org/0000-0002-8866-7592>, n.petrov@niuitmo.ru

*The article was submitted to the editorial office 20.12.2022
Approved after review 30.05.2023
Accepted for publication 18.08.2023*