

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS,
INSTRUMENT MAKING
AND COMMUNICATIONS

УДК 535.411.854

DOI: 10.17212/2782-2001-2025-3-137-148

О структуре цифровых голографических изображений*

В.И. ГУЖОВ^а, С.П. ИЛЬИНЫХ^б, К.В. ЗАХАРОВ^с

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НЭТИ)

^а vigguzhov@gmail.com ^б isp51@yandex.ru ^с z-cat@mail.ru

В статье рассмотрена структура образования голографических изображений. Голограмма – это результат интерференции двух волновых фронтов. Один из фронтов, объектный, отражается от объекта с шероховатой поверхностью. При отражении от такой поверхности возникает диффузное отражение, такое что луч, падающий на поверхность, рассеивается под многими углами, а не только под одним углом, как в случае зеркального отражения. В качестве же опорного обычно используется волновой фронт с простой формой (плоской или сферической).

Поэтому считается, что если рассматривать голограмму в микроскоп, то будет видна система чередующихся светлых и темных полос, как в интерферометрии. Однако при увеличении голограммы под микроскопом видна шумовая структура, напоминающая картину спеклов.

В то же время если рассматривать голограмму, то обычно на ней удастся проследить систему чередующихся полос, которые многие исследователи и принимают за систему интерференционных полос, образующих голограмму. Однако период этих полос значительно больше, чем период интерференционных полос.

В голографии возникновение шумовой структуры и образование системы полос имеет несколько другую природу. Показано, что причиной возникновения шумовой структуры является перекачка из фазовой составляющей объектного волнового фронта при диффузном отражении в интенсивность голографического изображения. Причиной возникновения макрополос является наклон опорного волнового фронта. Их структуру можно визуализировать при ослаблении волнового фронта, отраженного от объекта. Такой метод может быть полезным при настройке оптической измерительной системы.

Ключевые слова: быстрое преобразование Фурье, зона Фраунгофера, голографическое изображение, восстановление изображений из голограмм, действительное изображение, мнимое изображение, спекл, цифровая голограмма, фотоматрица

* Статья получена 21 марта 2025 г.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта №24-29-00006 «Разработка методов цифровой голографической интерферометрии».

ВВЕДЕНИЕ

Оптическая голография – это метод записи и восстановления оптических волновых полей, основанный на регистрации интерференционной картины, формируемой волнами, отраженными от объекта и опорного источника. Структура голограммы зависит от способа формирования предметной и опорной волн и от способа записи интерференционной картины. В качестве опорной обычно используется волновой фронт с простой и легко воспроизводимой формой (например, плоской или сферической).

В отличие от классической интерферометрии, в голографии рассматриваются волны, отраженные от шероховатой поверхности [1–12]. При двухлучевой схеме оптический волновой фронт разделяется интерферометром на два фронта – объектный и опорный. Голограмма формируется при их сложении. Объектный волновой фронт образуется при его отражении от шероховатого объекта, а опорный – под некоторым углом к плоскости регистрации голограммы (внеосевая голограмма).

Шероховатость – это совокупность неровностей, которые образуют микрорельеф поверхности. Вследствие шероховатости поверхности объекта возникает диффузное отражение. В отличие от зеркального отражения, где волновой фронт отражается под одним углом, при диффузном отражении рассеивание волнового фронта происходит под различными углами. Условие образования диффузного отражения описывается критерием Рэлея. Этот критерий учитывает высоту неровностей отражающей поверхности h , длину волны падающего на объект волнового фронта λ и угол падения на поверхность объекта (т. е. угол между нормалью к поверхности и падающим волновым фронтом).

$$h < \frac{\lambda}{8 \cos \varphi}. \quad (1)$$

Следует отметить, что при отражении от объекта волновой фронт изменяет как свою амплитуду, так и фазу в зависимости от размеров и наклона неоднородности в локальной области поверхности объекта.

Поскольку голограмма является интерференционной картиной, то считается, что, если рассматривать голограмму в микроскоп, будет видна система чередующихся светлых и темных полос. Однако это не так (рис. 1). При освещении диффузной поверхности лазерным излучением наблюдается картина спеклов [15]. На рис. 1 отчетливо видна шумовая структура, напоминающая картину спеклов (светлые пятна, крапинки – их и называют спеклами, которые разделены темными участками изображения). Спекл-структура возникает из-за пространственного ограничения спектров интерферирующих волн. Такие ограничения возникают в результате конечного размера апертуры, используемой для наблюдения или формирования интерферирующих пучков [13–17].

В то же время на голограмме обычно также удается проследить систему чередующихся полос (рис. 2), которые многие исследователи принимают за систему интерференционных полос, образующих голограмму.

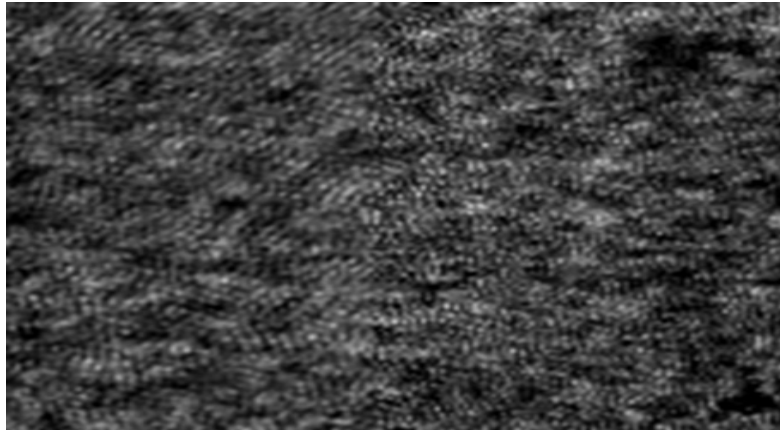


Рис. 1. Часть голограммы под микроскопом (увеличение 20×).
Поле зрения 1,075 мм

Fig. 1. Part of the hologram under the microscope (magnification 20×).
The field of view is 1,075 mm

Отметим, что расстояние между интерференционными полосами определяется из условия [23]

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin(\alpha / 2)}, \quad (2)$$

где λ – длина волны; α – угол между интерферирующими плоскими пучками. При $\lambda = 0,6$ мкм и $\alpha = 5^\circ$ размер между полосами составит 7,6 мкм. Причиной возникновения макрополос является наклон и неоднородность опорного волнового фронта.

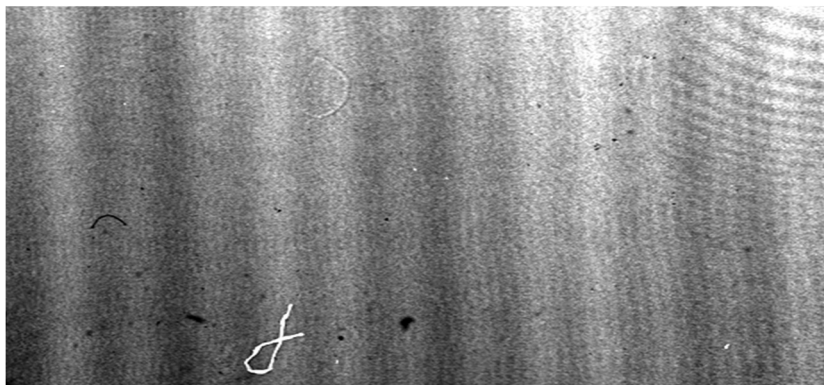


Рис. 2. Оцифрованная голограмма при углах между интерферирующими пучками 5 градусов (10 033 × 5805 пикселей). Размер голограммы 50 мм

Fig. 2. A digitized hologram at angles between interfering beams of 5 degrees (10,033 × 5,805 pixels). The hologram size is 50 mm

Структуру макрополос можно визуализировать при ослаблении волнового фронта, отражающегося от объекта. Такой метод может быть полезным при настройке оптической измерительной системы.

В голографии возникновение спекл-структуры и образование системы полос имеет несколько другую природу. Рассмотрение структуры образования цифровых голографических изображений и является целью настоящей статьи.

1. ОБРАЗОВАНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Голографическое изображение может регистрироваться на фотопластинке (аналоговая голограмма) или матрице цифровой камеры (цифровая голограмма) в виде интерференционной картины, образованной опорным и объектным волновыми фронтами. Для регистрации отражающих голограмм (рис. 3) обычно используется оптическая схема, впервые описанная Э. Лейтом и Ю. Упатниексом [18].

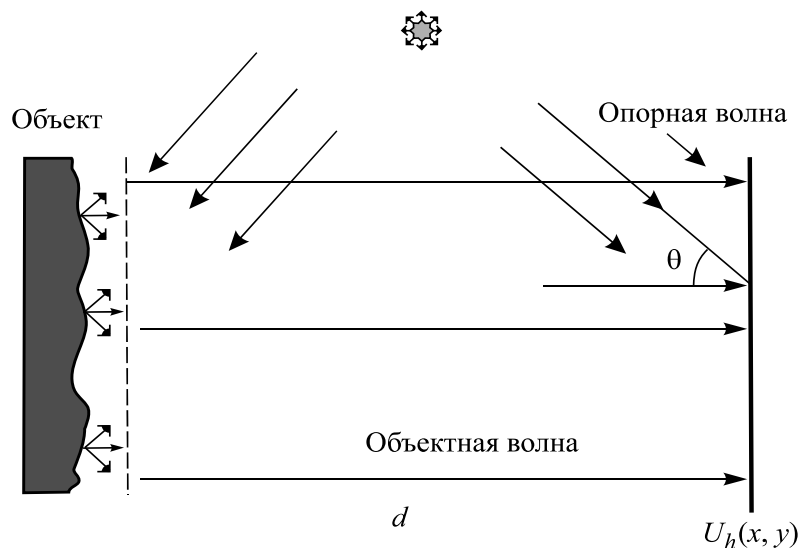


Рис. 3. Образование голографической картины как результат интерференции объектного и опорного волновых фронтов

Fig. 3. Formation of a holographic picture as a result of interference of object and reference wave fronts

В случае если голограмма фиксируется в зоне Фраунгофера, где волновой фронт можно рассматривать как сумму плоских волновых фронтов для восстановления голографического изображения, используют преобразование Фурье [19–21].

Из уравнений Максвелла следует, что регистрируемая голограмма представляет собой интенсивность интерференционной картины, которая пропорциональна квадрату модуля комплексной амплитуды (т. е. произведению комплексной амплитуды на величину, комплексно-сопряженную с ней) [22].

Комплексная амплитуда объектной волны в плоскости регистрации (x, y) (пунктирная линия на рис. 3) имеет вид

$$\overline{A_0}(x, y) = A_0(x, y) \exp[i\varphi_0(x, y)], \quad (3)$$

где A_0 – амплитуда, а φ_0 – фаза объектного волнового фронта.

В соответствии с волновой теорией при прохождении расстояния d (см. рис. 3) в области Фраунгофера волновой фронт претерпевает преобразование Фурье, и тогда в области формирования голограммы имеем

$$U_0(x, y) = \mathfrak{Z}(\overline{A_0}) = \mathfrak{Z}(A_0(x, y)) \otimes \mathfrak{Z}(\exp[i\varphi_0(x, y)]) . \quad (4)$$

Расписывая выражение (4), получим

$$U_0(x, y) = \mathfrak{Z}(A_0(x, y)) \otimes \mathfrak{Z}(\cos[\varphi_0(x, y)]) + \\ + i \mathfrak{Z}(A_0(x, y)) \otimes \mathfrak{Z}(\sin[\varphi_0(x, y)]) . \quad (5)$$

Как было отмечено, распределение $U_0(x, y)$ может быть вычислено с помощью интеграла Фурье. Из (5) следует, что в результате свертки часть фазовой информации будет перекачана в интенсивность.

Аналогично для опорной волны можно записать

$$U_r(x, y) = E_r(x, y) \exp[i\varphi_r(x, y)] , \quad (6)$$

где E_r – амплитуда, а φ_r – фаза опорной волны.

Интенсивность интерференционной картины (цифровой голограммы) представим как

$$U_h(x, y) = E_0^2 + E_r^2 + U_0 E_r \exp\{i[-\varphi_r(x, y)]\} + U_0^* E_r \exp\{i[\varphi_r(x, y)]\} . \quad (7)$$

Однако аналитическое вычисление комплексной амплитуды $U_0(x, y)$ в плоскости формирования голограммы представляет сложную задачу. Поэтому проведем компьютерное моделирование этого процесса.

2. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Пусть при отражении от объекта образуется комплексное волновое поле (в плоскости пунктирной линии на рис. 3). Размер изображения регистрируемого поля 4094×4095 , а объекта 1024×512 255 пикселей с равной амплитудой и случайной фазой. Здесь шероховатость поверхности задается шумовой составляющей фазы (фаза изменяется по случайному закону от $-0,02$ до $0,02$ радиан) (рис. 4, б). Принятые параметры модели соответствуют 6-му классу шероховатости (ГОСТ Р 70117–2022).

Комплексная пространственная амплитуда плоской волны может быть представлена как

$$\vec{A}_r(x, y) = a_r \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta_x x + \sin \theta_y y)\right) . \quad (8)$$

При $\theta_x = 7^\circ$, $\theta_y = 7^\circ$, $\lambda = 0,6$ мкм и $a_r = 255$, первые 800×600 точек фазы опорного фронта показаны на рис. 5.

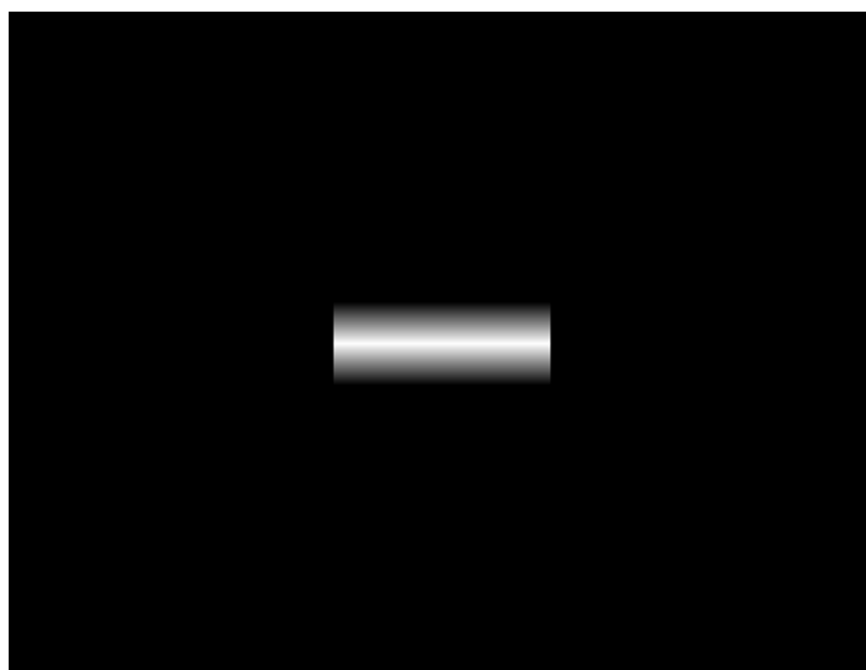
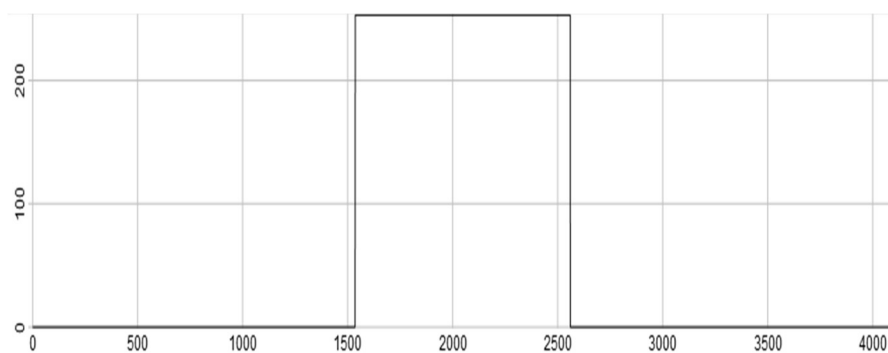
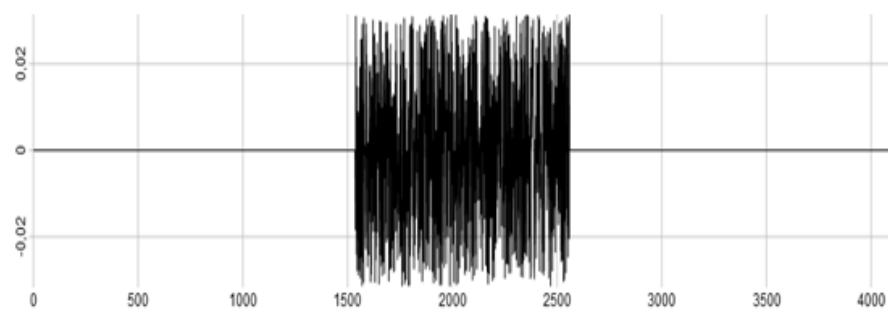
 a  b  c

Рис. 4. Изображение объектного волнового фронта (a). Амплитуда и фаза в среднем сечении (b и c соответственно)

Fig. 4. An image of the object wavefront (a). Amplitude and phase in the middle section (b and c respectively)

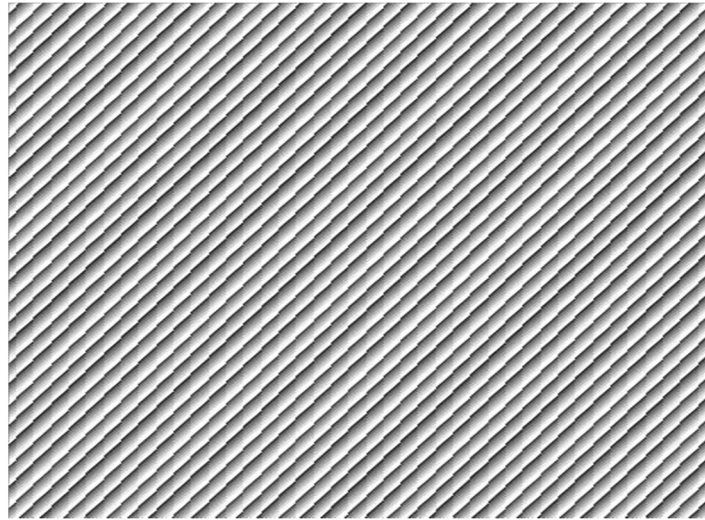


Рис. 5. Первые 800×600 точек опорного фронта при углах 7° по x и y . Общее число точек 4096×4096

Fig. 5. The first 800×600 points of the reference front at x and y angles of 7 deg-degrees. The total number of points is 4096×4096

После преобразования Фурье модели объектного фронта (рис. 4), добавляя к полученной комплексной амплитуде опорную волну, получим интенсивность цифровой голограммы (рис. 6).

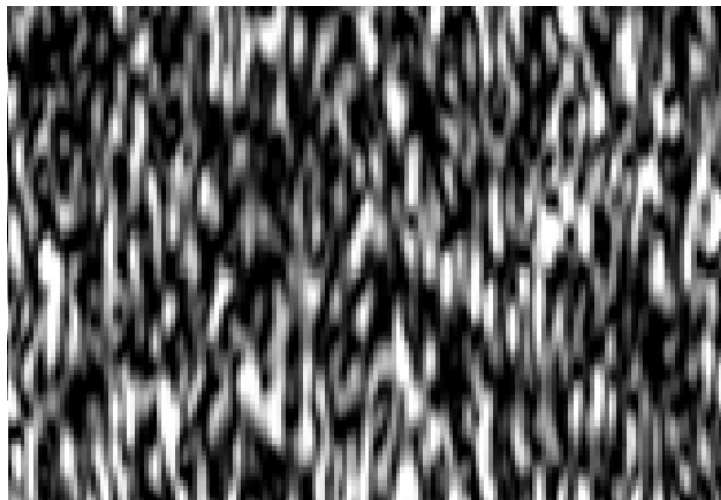


Рис. 6. Первые 800×600 точек цифровой голограммы объекта (всего 4096×4096 точек)

Fig. 6. The first 800×600 pixels of the digital hologram of the object (total 4096×4096 pixels)

Если изменить освещенность объекта, то при сложении волнового фронта в плоскости голограммы с опорным фронтом получим распределение амплитуды с такой же ориентацией полос, как в опорном фронте (рис. 7).

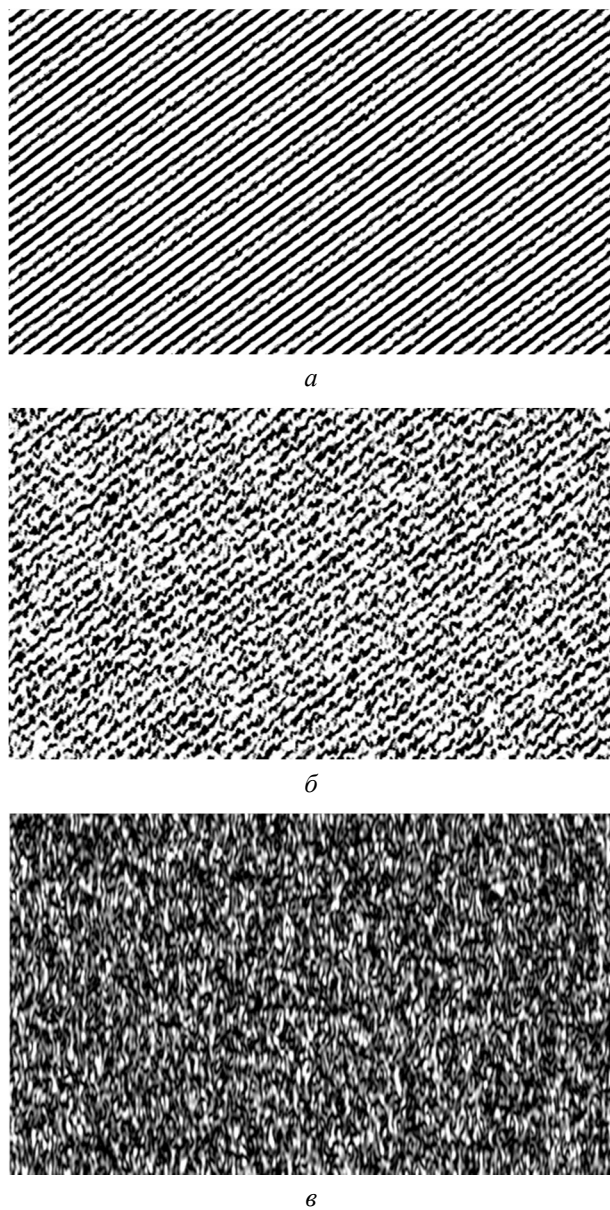


Рис. 7. Амплитуда цифровой голограммы при ослаблении освещенности объекта и ослаблении интенсивности объектного пучка на 64 (*a*), на 16 (*б*) и без ослабления (*в*)

Fig. 7. The amplitude of the digital hologram when the object illumination is attenuated by 64 (*a*), by 16 (*b*), and without attenuation (*c*)

Из рис. 7 следует, что интенсивность при ослаблении объектного волнового фронта можно выявить структуру интерференционных полос, образованных опорным волновым фронтом. Такой метод может быть полезным при настройке оптической системы, поскольку он позволяет визуализировать качество опорного волнового фронта.

3. ВЛИЯНИЕ СПЕКЛОВ НА КАЧЕСТВО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Размер спеклов может существенно превышать период полос на голограмме. Однако действительное и мнимое изображения восстанавливаются.

Действительное и мнимое изображения объекта можно получить после преобразования Фурье от голограммы (см. рис. 6). Для учета размера фотоприемного датчика при моделировании цифровой голограммы на этапе ее регистрации усредним ее интенсивности с окном 4×4 (рис. 8).

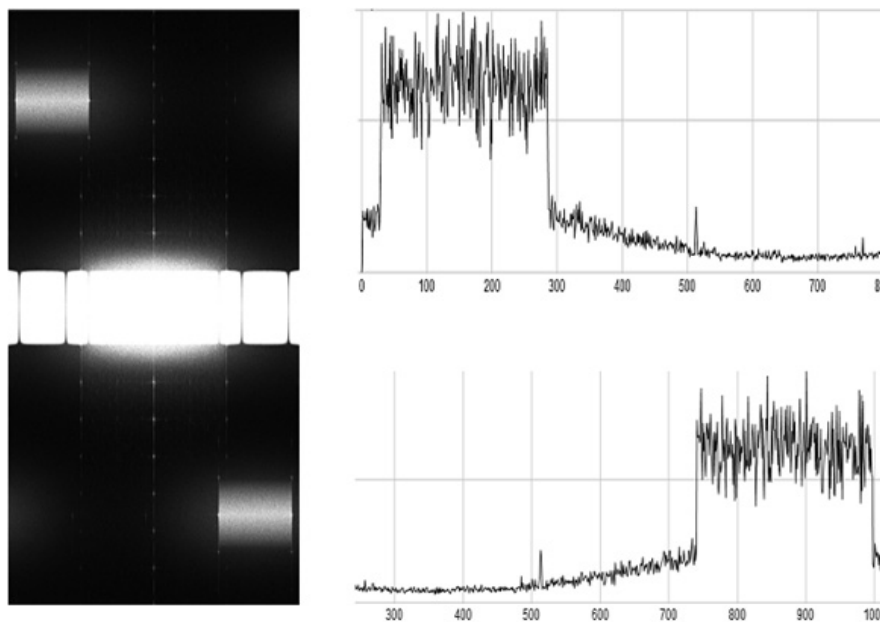


Рис. 8. Восстановленное изображение (слева) и графики по центральной строке действительного и мнимого (справа, сверху вниз) изображения объекта

Fig. 8. Reconstructed images and graphs from the center line of the actual (left) and imaginary (right, top to bottom) image of the object

На рис. 8 видно, что при восстановлении действительного и мнимого изображений (левый ряд) их амплитуда модулирована шумом (правый ряд), похожим на спекл-структуру, которая образуется при освещении когерентным пучком шероховатой поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены процессы образования структуры цифровой голограммы. Показано, что причиной возникновения шумовой составляющей, мнимого и действительного изображений является «перекачка» фазы волнового фронта, отраженного от объекта, в интенсивность голографического изображения, а причиной возникновения макрополос является наклон опорного волнового фронта.

Предложен метод визуализации опорного волнового фронта, позволяющий выполнять его коррекцию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сороко Л.М.* Голография и интерференционная обработка информации // Успехи физических наук. – 1966. – Т. 90 (9). – С. 3–46.
2. *Сороко Л.М.* Основы голографии и когерентной оптики. – М.: Наука, 1971. – 616 с.
3. *Строук Дж.* Введение в когерентную оптику и голографию. – М.: Мир, 1967. – 347 с.
4. *Де Велис Д.Б., Рейнольдс Д.О.* Голография: пер. с англ. – М.: Воениздат, 1970. – 248 с.
5. *Франсон М.* Голография: пер. с фр. – М.: Мир, 1972. – 246 с.
6. *Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л.* Оптическая голография. – М.: Мир, 1973. – 686 с.
7. Голография: методы и аппаратура / под ред. В.М. Гинзбург, Б.М. Степанова. – М.: Советское радио, 1974. – 376 с.
8. *Сойфер В.А.* Цифровая голография и ее применение: учебное пособие. – Куйбышев: Куйбыш. авиац. ин-т, 1978. – 84 с.
9. *Миллер М.* Голография. – Л.: Машиностроение, 1979. – 207 с.
10. *Уиньон М.* Знакомство с голографией: пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 191 с.
11. Оптическая голография. В 2 т. / под ред. Г. Колфилда. – М.: Мир, 1982.
12. *Narayanan R.* Basics of holography. – Cambridge University Press, 2002.
13. *Коронкевич В.П.* Формирование изображения в оптических системах: учебное пособие / В.П. Коронкевич. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 76 с.
14. *Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Ушверидзе Л.А.* Расчет параметров сканирования интерферометрической системы контроля формы диффузно отражающих объектов // Приборы. – 2012. – № 7 (145). – С. 23–25.
15. *Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т.* Исследование влияния спекл-структуры на формирование интерференционного сигнала и погрешность измерений // Научное приборостроение. – 2013. – Т. 23, № 2. – С. 38–46.
16. *Клименко Н.С.* Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. – М.: Наука, 1985. – 224 с.
17. *Короленко П.В.* Оптика когерентного излучения. – М.: МГУ, 1997. – 222 с.
18. *Leith E.N., Upatnieks J.* Reconstructed wavefronts and communication theory // Journal of the Optical Society of America. – 1962. – Vol. 52. – P. 1123–1130.
19. *Гужов В.И.* Компьютерная голография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 270 с. – ISBN 978-5-8114-3410-7.
20. *Cooley J.W., Tukey J.* An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series // Mathematics and Computation. – 1965. – Vol. 19 (90). – P. 297–301.
21. *Гужов В.И., Ильиных С.П., Андриященко Е.В.* Алгоритм быстрого преобразования Фурье для восстановления изображений из голограмм, зарегистрированных с помощью фотоматриц произвольного размера // Системы анализа и обработки данных. – 2024. – № 1 (93). – С. 71–81. – DOI: 10.17212/2782-2001-2024-1-71-81.
22. *Гужов В.И., Захаров К.В., Чернов О.В.* Регистрация голограмм с наклонным опорным пучком с помощью современных фотоматриц // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 9 (105). – С. 597–603. – URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8673> (дата обращения: 11.09.2025).
23. *Гужов В.И., Ильиных С.П.* Оптические измерения. Компьютерная интерферометрия: учебное пособие. – 2-е изд. – М.: Юрайт, 2018. – 258 с.

Гужов Владимир Иванович, профессор кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета, доктор технических наук. Автор 280 научных работ, в том числе обладатель четырех патентов. Область научных интересов: информационно-измерительные системы, высокоточные измерения, программная инженерия. E-mail: vigguzhov@gmail.com

Ильиных Сергей Петрович, профессор кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета, доктор технических наук. Автор более 170 научных работ, в том числе учебника НГТУ и 4 патентов. Область научных интересов: разработка алгоритмов анализа изображений в оптических измерительных системах. E-mail: isp51@yandex.ru

Захаров Константин Владимирович, старший преподаватель кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Автор 12 научных работ. Область научных интересов: информационно-измерительные системы, высокоточные измерения, программная инженерия. E-mail: k.zaharov@corp.nstu.ru

Guzhov Vladimir I., professor at the Department of Data Acquisition and Processing Systems in the Novosibirsk State Technical University, Doctor of Technical Sciences. He is the author of 280 scientific works, including 4 patents. His research interests: cover information-measuring systems, high-precision measurements, and software engineering. E-mail: vigguzhov@gmail.com

Ilyinykh Sergey P., professor at the Department of Computer Science in the Novosibirsk State Technical University, Doctor of Technical Sciences. He is the author of more than 170 scientific works, including the textbook of NSTU and 4 patents. His research interests include development of algorithms for image analysis in optical measurement systems. E-mail: isp51@yandex.ru

Zakharov Konstantin V., senior lecturer at the information protection department in the Novosibirsk State Technical University. He is the author of 12 scientific works. His research interests cover information-measuring systems, high-precision measurements, and software engineering. E-mail: z-cat@mail.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2025-3-137-148

On the structure of digital holographic images*

V.I. GUZHOV^a, S.P. ILINYKH^b, K.V. ZAKHAROV^c

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a vigguzhov@gmail.com ^b isp51@yandex.ru ^c z-cat@mail.ru

Abstract

The paper considers the structure of holographic image formation. A hologram is the result of interference of two wave fronts. One of the fronts is an object front – it is reflected from an object with a rough surface. When reflecting from such a surface, diffuse reflection occurs, such that the ray falling on the surface is scattered at many angles, not only at one angle, as in the case of specular reflection. In contrast, a wavefront with a simple shape (flat or spherical) is usually used as a reference.

Therefore, it is believed that if one considers a hologram in a microscope, one will see a system of alternating light and dark fringes as in interferometry. However, when the hologram is magnified under a microscope, a noise structure resembling a speckle pattern is seen.

At the same time, if one considers an ordinary hologram, one can usually trace on it a system of alternating fringes, which many researchers take as a system of interference fringes forming a hologram. However, the period of these fringes is much longer than the period of interference fringes.

In holography the appearance of the noise structure and the formation of the fringe system have a slightly different nature. It is shown that the cause of the noise structure is the pumping from the phase component in diffuse reflection to the intensity of the holographic image. And the cause of macro fringes is the tilt and inhomogeneity of the reference wavefront. This tilt can be visualized by attenuating the wavefront reflected from the object. Such a method can be useful for tuning the optical system.

Keywords: fast Fourier transform, Fraunhofer zone, holographic image, image reconstruction from holograms, real image, imaginary image, speckle, digital hologram, photomatrix

REFERENCES

1. Soroko L.M. Golografiya i interferentsionnaya obrabotka informatsii [Holography and interference information processing]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Soviet Physics Uspekhi*, 1966, vol. 90 (9), pp. 3–46. (In Russian).
2. Soroko L.M. Osnovy golografii i kogerentnoi optiki [Fundamentals of holography and coherent optics]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 616 p.
3. Stroke J. *An introduction to coherent optics and holography*. New York, Academic Press, 1966 (Russ. ed.: Strouk Dzh. *Vvedenie v kogerentnuyu optiku i golografiyu*. Moscow, Mir Publ., 1967. 347 c.).
4. DeVelis J.B., Reynolds G.O. *Theory and applications of holography*. Addison-Wesley, 1967 (Russ. ed.: De Velis D.B., Reinol'ds D.O. *Golografiya*. Moscow, Voenizdat Publ., 1970. 248 p.).

* Received 21 March 2025.

5. Françon M. *Holographie*. Paris, New York, Barcelone, Masson, 1969 (Russ. ed.: Franson M. *Golografiya*. Moscow, Mir Publ., 1972. 246 p.
6. Collie R., Burckhardt Ch., Lin L. *Optical Holography*. New York, Academic Press, 1971. 606 p. (Russ. ed.: Kol'er R., Berkkhart K., Lin L. *Opticheskaya golografiya*. Moscow, Mir Publ., 1973. 686 p.).
7. Ginzburg V.M., Stepanov B.M., eds. *Golografiya: metody i apparatura* [Holography. Methods and apparatus]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1974. 376 p.
8. Soifer V.A. *Tsifrovaya golografiya i ee primeneniye* [Digital holography and its applications]. Kuibyshev, Kuibyshevskii aviatsionnyi institut Publ., 1978. 84 c.
9. Miller M. *Holographie*. K. Thiemig, 1978 (Russ. ed.: Miller M. *Golografiya*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979. 207 p.).
10. Venyon M. *Understanding holography*. Newton Abbot, 1978 (Russ. ed.: Uin'on M. *Znakomstvo s golografiyei*. Moscow, Mir Publ., 1980. 191 p.).
11. Caulfield H.J., ed. *Handbook of optical holography*. New York, Academic Press, 1979 (Russ. ed.: *Opticheskaya golografiya*. V 2 t. Ed. by. G. Kol'fild. Moscow, Mir Publ., 1982).
12. Hariharan P. *Basics of holography*. Cambridge University Press, 2002.
13. Koronkevich V.P. *Formirovaniye izobrazheniya v opticheskikh sistemakh* [Image formation in optical systems]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2005. 76 p.
14. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. Raschet parametrov skanirovaniya interferometricheskoi sistemy kontrolya formy diffuzno otrazhayushchikh ob'ektov [Calculation of scanning parameters of the interfero-metric system for controlling the shape of diff-phase reflecting objects]. *Pribory = Instruments*, 2012, no. 7 (145), pp. 23–25.
15. Mayorov E.E., Prokopenko V.T. Issledovanie vliyaniya spekl-struktury na formirovaniye interferentsionnogo signala i pogreshnost' izmereniy [Study of the speckle structure influence on the formation of the interference signal and measurement error]. *Nauchnoe priborostroenie = Scientific Instrumentation*, 2013, vol. 23, no. 2, pp. 38–46.
16. Klimenko N.S. *Golografiya sfokusirovannykh izobrazheniy i spekl-interferometriya* [Focused image holography and speckle interferometry]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 224 p.
17. Korolenko P.V. *Optika kogerentnogo izlucheniya* [Optics of coherent emission]. Moscow, MSU Publ., 1997. 222 p.
18. Leith E.N., Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory. *Journal of the Optical Society of America*, 1962, vol. 52, pp. 1123–1130.
19. Guzhov V.I. *Komp'yuternaya golografiya* [Computer holography]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2018. 270 p. ISBN 978-5-8114-3410-7.
20. Cooley J.W., Tukey J. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics and Computation*, 1965, vol. 19 (90), pp. 297–301.
21. Guzhov V.I., Ilinykh S.P., Andryushchenko E.V. Algoritm bystrogo preobrazovaniya Fur'e dlya vosstanovleniya izobrazheniy iz gologramm, zaregistrovannykh s pomoshch'yu fotomatrits proizvol'nogo razmera [Fast Fourier transform algorithm for image reconstruction from digital holograms recorded using photomatrices of arbitrary size]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2024, no. 1 (93), pp. 71–81. DOI: 10.17212/2782-2001-2024-1-71-81.
22. Guzhov V.I., Zakharov K.V., Chernov O.V. Registratsiya gologramm s naklonnym opornym puchkom s pomoshch'yu sovremennykh fotomatrits [Registration of holograms with an inclined reference beam using modern photosensors]. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Journal of Don*, 2023, no. 9 (105), pp. 597–603. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n9y2023/8673> (accessed 11.09.2025).
23. Guzhov V.I., Ilinykh S.P. *Opticheskie izmereniya. Komp'yuternaya interferometriya* [Optical measurements. Computerized interferometry]. 2nd ed. Moscow, Yurait Publ., 2018. 258 p.

Для цитирования:

Гужов В.И., Ильиных С.П., Захаров К.В. О структуре цифровых голографических изображений // Системы анализа и обработки данных. – 2025. – № 3 (99). – С. 137–148. – DOI: 10.17212/2782-2001-2025-3-137-148.

For citation:

Guzhov V.I., Ilinykh S.P., Zakharov K.V. O strukture tsifrovyykh golograficheskikh izobrazheniy [On the structure of digital holographic images]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2025, no. 3 (99), pp. 137–148. DOI: 10.17212/2782-2001-2025-3-137-148.

ISSN 2782-2001, <http://journals.nstu.ru/vestnik>
Analysis and data processing systems
 Vol. 99, No 3, 2025, pp. 137–148