

Получение объемных изображений с помощью цифровой голографии по двум стереоизображениям

В.И. Гужов, К.В. Захаров, А.К. Герасимов

Новосибирский государственный технический университет

Аннотация: В статье рассмотрен вопрос получения объемных изображений объекта с помощью цифровой голографии. Существует несколько способов, основанных на методах голографической интерферометрии: метод смещенного источника, иммерсионный метод, метод двух длин волн, использование источника освещения малой когерентности. Каждый из рассмотренных методов имеет определенные преимущества и недостатки. В большинстве случаев требуется количественная информация о параметрах рельефа. Однако плохое качество топографических полос и проблема с определением знака при определении рельефа вызывают значительные сложности при определении объема. Возникающие проблемы могут быть устранены использованием простого метода определения объема по двум стереоизображениям, восстановленным из голограмм и последующего уточнения с использованием одного из методов получения голографических топографических карт. В данной работе показан способ определения объемного изображения по двум стереоизображениям объекта, восстановленным из цифровых голограмм.

Ключевые слова: получение голограмм и восстановление из них изображений, цифровая голография, пространственное разрешение голограмм, стереоизображения, восстановление объемных изображений.

Введение

При записи голограмм [1] оптическая волна от когерентного источника освещения разбивается на две части: объектная волна отражается от объекта с диффузной поверхностью и интерферирует с опорной волной на поверхности светочувствительной пластинки. В результате в голограмме сохраняется информация об амплитуде и фазе волны, отраженной от объекта. Это позволяет восстановить информацию о 3-D профиле объекта.

Голографические измерительные системы рассматривались как наиболее перспективные технологии в экспериментальной механике. Однако использование фотохимических процессов для записи голограмм сдерживала широкое применение таких систем в инженерной практике. Появление метода цифровой голографии, в котором регистрация интерференционной

картины осуществляется с использованием электронной матрицы фотоприёмников, позволило сделать их более технологичными [2].

В 2021 году в России появился ГОСТ по оптике, фотонике и голографии (в трех частях: ГОСТ Р 59321.1-2021, Р 59321.2-2021, Р 59321.3-2021), в котором даны основные определения аналоговой, цифровой и компьютерной голографии.

- Классическая аналоговая голография охватывает методы записи голограмм на физические светочувствительные носители.

- Цифровая голография – метод, при котором волновой фронт от аналоговых сцен регистрируется с помощью матрицы фотоприёмников.

- Компьютерная голография (synthesized holography - англ.) это запись на аналоговые носители голограмм синтезированных моделей.

Отличие цифровой голографии от аналоговой в том, что регистрация голограмм осуществляется с помощью матрицы фотоприёмников и восстановление изображения объекта осуществляется полностью с помощью компьютера [3].

Для получения 3-D рельефа объектов методами голографической интерферометрии используются следующие методы[4]:

- Метод смещенного источника [5]. В этом методе получают две голограммы исследуемого объекта. Перед записью второй голограммы изменяют положение источника освещения. Восстановленные из голограмм изображения интерферируют между собой. В результате возникают топографические полосы, по которым можно восстановить рельеф объекта.

- Иммерсионный метод [6] заключается в том, что исследуемый объект помещают в кювету, заполняемую прозрачным газом или жидкостью и записывают голограмму. После этого изменяют показатель преломления заменой газа или жидкости и вторично записывают голограмму. При

восстановлении из голограммы образуется два изображения, при интерференции которых образуются топографические полосы.

- Метод двух длин волн [5]. На фотопластинку записываются две голограммы одного и того же объекта, при освещении с разными длинами волн. При восстановлении образуются топографические полосы.

- Использование источника освещения малой когерентности [3]. Форму объекта можно определить по серии голограмм при освещении объекта источником с малой когерентностью и последовательных сдвигах опорного зеркала.

Каждый из рассмотренных методов имеет определенные преимущества и недостатки. В ряде случаев достаточно качественного анализа топографических картин. Однако в большинстве случаев требуется количественная информация о параметрах рельефа. Плохое качество топографических полос и проблема с определением знака при определении рельефа вызывают значительные сложности при определении объёма.

Возникающие проблемы могут быть устранены использованием простого метода определения объема по двум стереоизображениям, восстановленным из голограмм и последующего уточнения с использованием одного из методов получения голографических топографических карт.

Получение цифровых голограмм

При интерференции двух плоских волн образуется картина полос. Расстояние между центрами полос определяется как [7]

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta / 2)} .$$

Например, при угле между интерферирующими пучками $\theta = 30^\circ$ и длиной волны источника $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$, расстояние между полосами $\Delta x \approx 1,16 \text{ мкм}$. По теореме Котельникова необходимо, чтобы

пространственное разрешение при регистрации составляло как минимум две точки на полосу, поэтому .

Для регистрации голограмм наиболее часто используется оптическая схема с наклонными пучками, впервые описанная Э. Лейтом и Ю. Упатниексом [1,8,9] в 1962 г. При восстановлении изображений из голограммы для разделения дифракционных пучков требуется, чтобы угол между интерферирующими пучками составлял 30-60 градусов. Необходимое пространственное разрешение фотоматериалов при этом должно составлять 2000-4000 линий/мм.

В настоящее время существуют цифровые матрицы фотоприёмников, позволяющие регистрировать голограммы с параметрами близкими к разрешению светочувствительных пластинок, которые используются для записи классических аналоговых голограмм [10]. Для получения голограмм нами использовалась матрица фотоприёмников с разрешением 60 Мп (9000x6752) и размером одного элемента 0,86 мкм x 0,86 мкм.

На следующем рисунке показана цифровая голограмма и восстановленное из неё изображение. Для получения изображений использовалось дискретное преобразование Фурье.

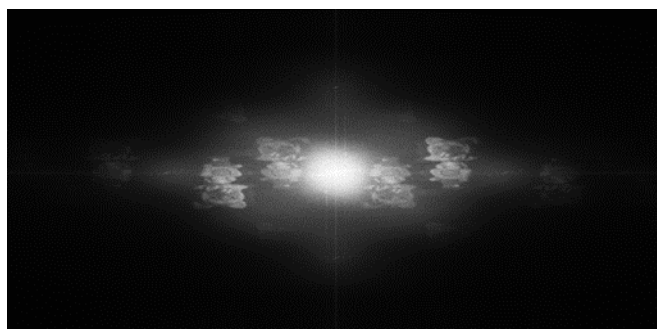


Рис. 1. – Цифровая голограмма (слева) и восстановленные из неё
действительное и мнимое изображения (справа)

На рис. 2 показана фотография объекта и увеличенное действительное изображение объекта, показанное на рис. 1. Размер объекта около 5 см.

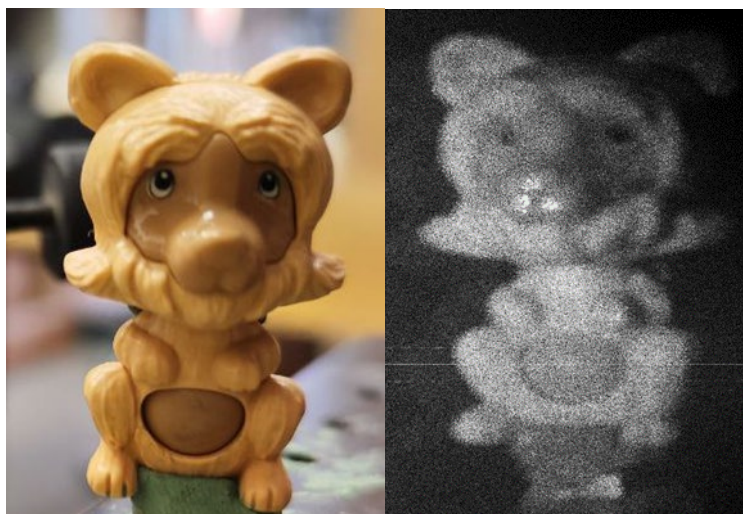


Рис. 2. – Фотография объекта и восстановленное из цифровой голограммы изображение (747x717 пикселей)

Получение объёмного изображения

При восстановлении изображения из голограммы становится возможным наблюдать изображение предмета в разных ракурсах. Если смотреть на голограмму двумя глазами, то каждый глаз будет видеть мнимое изображение, восстанавливаемое различными элементарными участками голограммы. Эти изображения являются плоскими, поскольку они создаются маленькими участками голограммы, но эти плоские изображения различаются из-за горизонтального параллакса, т.е. составляют стереопару, и в сознании наблюдателя возникает ощущение объёмности предметов.

Однако размер доступных существующих матриц фотоприемников сравнительно небольшой. В данной статье для записи цифровых голограмм использовалась матрица фотоприёмников с размером 7,7x5,8 мм.

Поэтому для создания стереопары использовался сдвиг камеры на величину около 2 см. Фиксировалось две голограммы. Из них восстанавливались изображения, которые и составляли стереопару. С

помощью двух стереоизображений формировалось объемное изображение по опорным точкам.

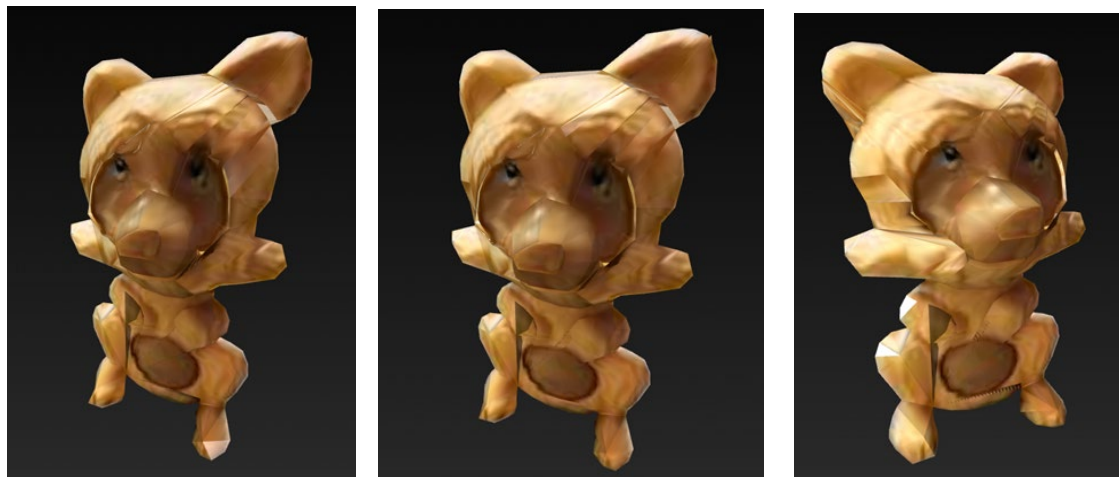


Рис. 3. – Разные ракурсы объемного изображения, полученного из стереопары

Выводы

В статье описан метод получения двух стереоизображений из цифровых голограмм и получения объемного изображения по ним. Сформированный рельеф может быть использован для уточнения одним из описанных в статье методов голографической интерферометрии.

Работа проводилась при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-29-00006 «Разработка методов цифровой голографической интерферометрии».

Литература

1. Оптическая голография /Под ред. Г. Колфилда: в 2 т. –М.: Мир, 1982, 735 с.
2. Гужов В.И., Ильиных С.П., Кузнецов Р.А., Кабак Е.С. Цифровая голографическая интерферометрия реального времени для

- экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния динамических объектов. - Омский научный вестник, Омск. – 2015. - №1(137) – С. 158 – 162.
3. Гуров И.П., Захаров А.С., Лопатухина А.Д. Компьютерное восстановление изображений методом цифровой голографии с источником освещения малой когерентности. Научно-технический вестник ИТМО -2006 -№11(34), с. 133-138.
 4. Козачок А.Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике. М. Машиностроение. - 1984. - 176 с.
 5. Haines K.A., Hildebrant B.P. Multiple-Wavelength and Multiple-Source Holography Applied to Contour Generation. - Journal of the Optical Society of America 57(2), 1967. - pp. 155-162. DOI: 10.1364/JOSA.57.000155.
 6. Norio Shiotake, Tadao Tsuruta, Yoshinobu Itoh, Jumpei Tsujiuchi, Naoya Takeya and Kiyofumi Matsuda. Holographic Generation of Contour Map of Diffusely Reflecting Surface by Using Immersion Method - Japanese Journal of Applied Physics, Volume 7, Number 8, 1968.- pp. 904-909. DOI: 10.1143/JJAP.7.904.
 7. Гужов В.И. Компьютерная голография: Монография. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. (ISBN: 978-5-8114-3410-7) — 270 с.
 8. Leith E. N., Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory - Journal of the Optical Society of America. – 1962. – Vol. 52. – pp. 1123-1130.
 9. Миллер М. Голография. - Л: Машиностроение, 1979, 140 с.
 10. Гужов В.И., Захаров К.В., Чернов О.В. Регистрация голограмм с наклонным опорным пучком с помощью современных фотоматриц - Инженерный вестник Дона. 2023. № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8673.
-

References

1. H.J. Caulfield. Handbook of Optical Holography 2 vol. Academic Press. 1979, 735 p.
2. Guzhov V.I., Il'iny`x S.P., Kuzneczov R.A., Kabak E.S. Omskij nauchny`j vestnik, Omsk. 2015. №1 (137). pp. 158 – 162.
3. Gurov I.P., Zakharov A.S., Lopatuxina A.D. Nauchno-texnicheskij vestnik ITMO. 2006. №11 (34), pp. 133-138.
4. Kozachok A.G. Golograficheskie metody` issledovaniya v e`ksperimental`noj mexanike [Holographic research methods in experimental mechanics]. M. Mashinostroenie. 1984. 176 p.
5. Haines K.A., Hildebrant B.P. Journal of the Optical Society of America 57(2), 1967. pp. 155-162. DOI: 10.1364/JOSA.57.000155.
6. Norio Shiotake, Tadao Tsuruta, Yoshinobu Itoh, Jumpei Tsujiuchi, Naoya Takeya and Kiyofumi Matsuda. Japanese Journal of Applied Physics, Volume 7, Number 8, 1968. pp. 904-909. DOI 10.1143/JJAP.7.904.
7. Guzhov V.I. Komp`yuternaya golografiya [Computer holography]: Monografiya. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2018. (ISBN: 978-5-8114-3410-7). 270 p.
8. Leith E. N., Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory - Journal of the Optical Society of America. 1962. Vol. 52. pp. 1123-1130.
9. Miller M. Golografiya [Holography]. L.: Mashinostroenie, 1979, 140p.
10. Guzhov V.I., Zakharov K.V., Chernov O.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8673.

Дата поступления: 20.11.2025

Дата публикации: 26.12.2025