

Регистрация голограмм с наклонным опорным пучком с помощью современных фотоматриц

В.И. Гужов, К.В. Захаров, О.В. Чернов

Новосибирский государственный технический университет

Аннотация: Рассматривается метод регистрации голограмм с помощью цифровых камер с высоким пространственным разрешением. Для регистрации голограмм, полученных в оптических установках с наклонным опорным пучком, требуется высокое разрешение систем регистрации. Для этого необходимо использовать среды с разрешением 2000-4000 линий на мм. Использование фотопластинок требует достаточно большого времени на экспозицию и проявку, которая обычно делается отдельно от оптической установки. В случае систем голографической интерферометрии необходимо предусмотреть установку голограммы обратно в оптическую установку с достаточно большой точностью. Поэтому для регистрации голограмм на фотоматрицах, имеющих ограниченное разрешение, были разработаны методы цифровой голографии. Эти методы основаны на использовании оптических схем при малых углах (менее 5 градусов) между интерферирующими пучками. В последнее время появились сенсоры с размером одного элемента 1,33 мкм и 0,56 мкм. Такое разрешение позволяет вернуться к схемам регистрации с углами между интерферирующими пучками 30-60 градусов. Это позволяет надеяться на возрождение методов голографии и методов голографической интерферометрии на современном уровне без использования промежуточных сред для регистрации.

Ключевые слова: голография, голографическая интерферометрия, фотоматрицы с высоким пространственным разрешением, голография наклонным опорным пучком, цифровая голография, преобразование Фурье.

Голографические картины (голограммы) образуются в результате интерференции двух волн: объектной, отраженной от исследуемого объекта и некоторой известной опорной волны. Для регистрации голограмм используется оптическая схема, впервые описанная Э. Лейтом и Ю. Упатниксом [1-3]. Для разделения дифракционных пучков при восстановлении изображений из голограммы требуется, чтобы угол между интерферирующими пучками составлял около 30-60 градусов. Это приводит к необходимости использовать фотоматериалы с пространственным разрешением более 2000 линий/мм.

Цифровая голография возникла, когда появилась возможность регистрации картин интерференции непосредственно на матрице

фотоприемников. Восстановление изображений (расшифровка) производится на компьютере. При этом необходимо получать голограммы с интерференционными полосами, которые могли бы зарегистрированы с помощью матричных фотоприёмников [4-6]. Пространственное разрешение существующих матричных фотоприемников позволяло регистрировать голограммы только при небольших углах между опорным и объектным пучками. При малых углах интерференции возможна запись голограмм только для плоских объектов. При увеличении углов, разрешение регистрирующего материала должно увеличиваться. При недостаточном разрешении могут быть использованы методы субпиксельного сдвига [7-9].

Рассмотрим картину интерференции плоских волн. Расстояние между центрами интерференционных полос можно найти, исходя из следующего выражения:

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

При $\theta = 15^\circ$ и $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$ - $\Delta x \approx 2,6 \text{ мкм}$. По теореме Котельникова для регистрации необходимо как минимум две точки на полосу, поэтому минимальное требуемое разрешение 1,3 мкм. В голографии один из пучков отражается от диффузной поверхности поэтому, конечно, разрешение сенсора должно быть больше.

В последнее время появились цифровые матрицы с разрешением, достаточным для записи голограмм обычных голограмм. Так компания SONY представила КМОП-сенсор с размером одного элемента 1,3 мкм x 1,3 мкм [10]. Число элементов 48 миллионов пикселей. Размер сенсора 6,4 x 4,8 мм.

Ниже делается попытка регистрации и восстановления голографических изображений с помощью такого сенсора.

Для получения голограммы использовалась оптическая установка (рис. 2) с углом между интерферирующими пучками 15 градусов (рис. 1).

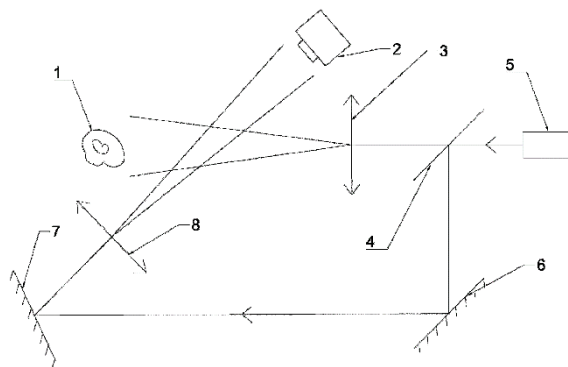
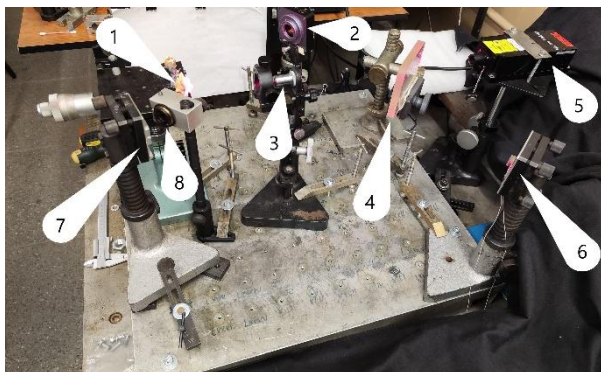


Рис. 1. – Слева: фотография голографической установки, справа: оптическая схема (1. Объект; 2. Камера; 3,8. Расширители пучка; 4. Делитель светового пучка; 5. Лазер; 6,7. Зеркала)

На рис. 2 показан участок оцифрованной голограммы (размер 4096x4096 пикселей) и восстановленные из нее действительное и мнимое изображения. Голограмма регистрировалась с помощью цифровой камеры. Поскольку голограмма фиксировалась в зоне Фраунгофера для восстановления использовалось преобразование Фурье. Время восстановления - 7,4 сек на компьютере с процессором Intel 3,4 GHz.

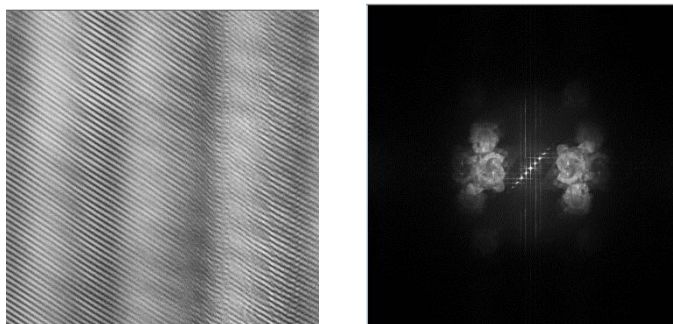


Рис. 2. – Восстановление изображения из голограммы (слева: оцифрованная голограмма, справа: восстановленное изображение).

В качестве объекта использовались пластиковые фигурки (рис. 3).

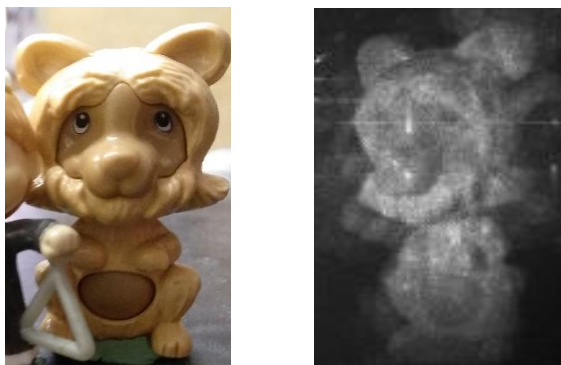


Рис. 3. – Объект и восстановленное из голограммы (рис. 2) изображение.

Видно, что разрешения камеры не хватает для полного устранения влияния центрального пучка на действительное и мнимое изображения.

Компания Samsung разработала матрицы ISOCELL HP3 с разрешением 200 Мп [11]. Размер одного элемента 0,56 мкм. Максимальное разрешение 16 384 x 12 288 пикселей. Размер сенсора - 9,2×7,2 мм. Использование камеры на основе такого сенсора может значительно улучшить качество восстановленного изображения.

Выводы

В статье показана возможность регистрации и восстановления голограмм с помощью сенсоров с высоким пространственным разрешением.

Огромные возможности голографических методов исследования сдерживаются необходимостью применения для регистрации голограмм фотоматериалов. Использование голографических фотопластинок и плёнок связано со сложными химическими процессами при обработке. Поэтому

измерительные системы на основе этих методов используются в основном в лабораторных условиях. Кроме того, для регистрации требуется значительное время, поэтому вибрации оптической установки оказывают значительное влияние на качество голограммы. Появление новых сенсоров с большим пространственным разрешением позволяет ожидать возрождения интереса к методам голографии, оправдывая надежды, которые возлагались на эти методы при их появлении.

Литература

1. Leith E. N., Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory // Journal of the Optical Society of America. – 1962. – Vol. 52. – pp. 1123-1130.
2. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. - Москва: Мир, 1973. – 686 с.
3. Миллер М. Голография. - Л.: Машиностроение, 1979, 140 с.
4. Goodman J.W., Lawrence R.W. Digital image formation from electronically detected holograms // Appl. Phys. Lett. 1967. 11, N 3. pp. 77–79.
5. Schnars U. Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms // J. Opt. Soc. Am. A. 1994. V.11. pp. 2011-2015.
6. Гужов В.И. Компьютерная голография: Монография. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. (ISBN: 978-5-8114-3410-7) — 270 с.
7. Гужов В.И., Марченко И.О., Поздняков Г.А., Ильиных С.П. Сверхразрешение в цифровой голографии // Инженерный вестник Дона. 2018. - № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5069
8. Гужов В.И., Марченко И.О., Трубилина Е.Е. Повышение пространственного разрешения сигналов в оптических системах // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 1. – С. 65-70. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-924.

9. Гужов В.И., Хайдуков Д.С., Захаров К.В., Майер О.Ю. Повышение пространственного разрешения цифровых голограмм с помощью одномерного субпиксельного сканирования // Системы анализа и обработки данных. 2023. № 1 (89). С. 81-90. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-81-90
10. Camera sensor IMX689 from Sony. URL: deviceranks.com/en/camera-sensor/721/sony-imx689-exmor-rs.
11. Samsung Isocell HP 3. URL: semiconductor.samsung.com/image-sensor/mobile-image-sensor/isocell-hp3/.

References

1. Leith E. N., Upatnieks J. Journal of the Optical Society of America. 1962. Vol. 52. pp. 1123-1130.
2. Collier R., Burckhardt K., Lin L. Opticheskaya Golografiya [Optical Holography]. Moskva: Mir, 1973. 686 с.
3. Miller M. Golografiya [Holography]. L.: Mashinostroenie, 1979, 140 p.
4. Goodman J.W., Lawrence R.W. Appl. Phys. Lett. 1967. 11, N 3. pp. 77–79.
5. Schnars U. J. Opt. Soc. Am. A. 1994. V.11. pp. 2011-2015.
6. V.I. Guzhov, Computer Holography. NSTU, Novosibirsk, 2018. 270 p.
7. Guzhov V.I., Marchenko I.O., Pozdnyakov G.A., Il'iny`x S.P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5069
8. Guzhov V.I., Marchenko I.O., Trubilina E.E. Komp'yuternaya optika, 2022, vol. 46 (1), pp. 65–70. DOI: 10.18287/2412-6179 - CO-924.
9. Guzhov V.I., Hajdukov D.S., Zaharov K.V., Majer O.Ju. Sistemy analiza i obrabotki dannyh. 2023. № 1 (89). pp. 81-90. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-81-90.
10. Camera sensor IMX689 from Sony URL: deviceranks.com/en/camera-sensor/721/sony-imx689-exmor-rs



11. Samsung Isocell HP 3. URL: semiconductor.samsung.com/image-sensor/mobile-image-sensor/isocell-hp3/