

Восстановление изображений из реальных голограмм, зафиксированных на фотопластинках

*В.И. Гужов, Е.Н. Денежкин, О.В. Чернов, Н.С. Зарубин
Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

Аннотация: Голографические системы позволяют измерять профиль диффузных объектов с высокой точностью. Благодаря наложению «предметной волны» от объекта с эталонной или «опорной волной», возникает интерференционная картина, которая фиксируется на фоточувствительной пластине. Для разделения перекрытия восстанавливаемых пучков используются оптические схемы, обеспечивающие большие (порядка 30 градусов) углы между объектным и опорным пучками. В этом случае шаг интерференционных полос меньше 1 мкм. В статье описана система для оцифровки реальных голограмм на основе оптического микроскопа и восстановления из них изображений для определения необходимого разрешения при разработке цифровых голографических систем.

Ключевые слова голография, обработка изображений, интерференция, цифровая голография.

ВВЕДЕНИЕ

Классическая интерферометрия имеет дело с прозрачными или хорошо отражающими (зеркальными) поверхностями. Голография – это метод регистрации, позволяющий зафиксировать как амплитуду, так и фазу произвольного оптического фронта, а затем воспроизвести их в любой удобный момент времени [1]. Так как полная информация о форме объекта содержится в оптическом поле, которое рассеивается исследуемым объектом при его освещении, голографический процесс позволяет регистрировать эту форму в неизменном виде. Сохраненную таким образом информацию о форме можно в любой момент времени воспроизвести и использовать в качестве шаблона. С появлением голографии появилась возможность проведения интерференционных измерений не только прозрачных и зеркальных (т. е. объектов с оптически чистой поверхностью), но и диффузно отражающих объектов [2, 3].

С совершенствованием вычислительной техники и цифровых средств регистрации оптических изображений методы оптического контроля получили новый толчок в своём развитии. Избавление от химических процессов, связанных с созданием и обработкой фотопластинок, существенно ускорило и удешевило процесс контроля. Цифровая

голография позволяет полностью избавиться от промежуточных фоторегистрирующих носителей, заменяя их цифровыми матрицами для регистрации голографических изображений [4, 5].

Однако разрешение современных цифровых матриц в настоящее время существенно меньше, чем разрешение фотоматериалов. Поэтому в ряде случаев необходим цифровой анализ голограмм, полученных обычным фотохимическим способом. Для этого голограммы оцифровываются с необходимым разрешением, а затем процесс расшифровки выполняется при помощи компьютерной техники.

Целью данной работы является разработка системы на основе оптического микроскопа для оцифровки голограмм, расшифровка изображений из голограмм, зарегистрированных на фотопластинках и определение необходимого разрешения для восстановления изображений.

1. СИСТЕМА ДЛЯ ВВОДА ГОЛОГРАММ НА ОСНОВЕ МОДИФИКАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА

Система для расширения поля зрения оптического микроскопа описана в [6, 7].

Для ввода голограмм в компьютер использовался модифицированный оптический микроскоп - Ломо Метам Р-1. Модификация микроскопа состояла в установке фотокамеры в качестве окуляра и установке автоматизированного предметного столика для перемещения объекта. Для регистрации изображений использовалась серийная цифровая камера Canon 650D. В качестве датчика в ней используется CMOS матрица с разрешением 18 млн. пикселей (5184 × 3456 пикселей). Размер матрицы 22,3 × 14,9 мм. Таким образом, физическая величина пикселя в матрице составляет 4,3 мкм. Изображение проецируется на матрицу без использования объектива. Фотокамера подключается через интерфейсный кабель. Кадр передается непосредственно в компьютер.

Предметный столик был заменен на моторизованный двухосный линейный транслятор. Движение по осям осуществляется с помощью двух шаговых двигателей. Величина перемещения на один шаг 2,5 мкм.

Точное позиционирование обеспечивалось сшиванием кадров с точностью до пикселя. Перемещение столика зависит от механической нестабильности установки, поэтому возможны

ошибки при сшивке кадров. Точность сшивки достигалась с помощью выделения особых точек. Изображения с большим увеличением снимают по частям, а затем программа распознает особые точки на краях изображений и пытается скомпоновать их в одно целое изображение. Использование программной сшивки различных кадров позволило отказаться от использования аппаратных измерительных средств контроля при перемещении предметного столика в случае сбоя шаговых двигателей.

Склеивание изображений позволяет расширить поле зрения микроскопа и получить одно изображение всей области с высоким разрешением. Поле зрения одного кадра при использовании восьмикратного (8X) микрообъектива $2,2 \times 1,5$ мм, при использовании микрообъектива 10X – $1,76 \times 1,18$ мм. При сшивке кадров возможна оцифровка объектов размером 100×100 мм.

Наблюдение проводилось в проходящем свете.

II. ПОЛУЧЕНИЕ ГОЛОГРАММ

Для получения голограмм использовалась следующая схема записи (Рис. 1).

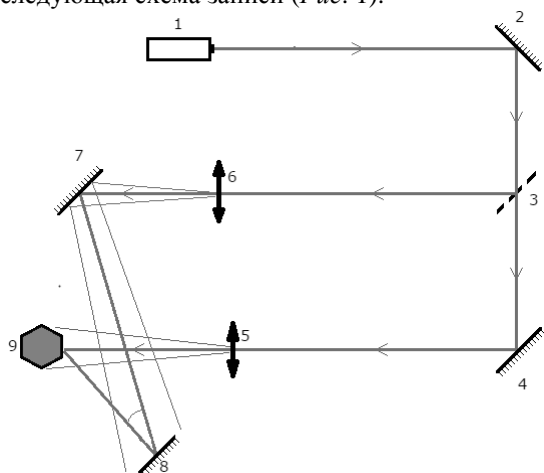


Рис. 1. Схема записи голограммы: (1 – лазер; 2,4,7 – отражающие зеркала; 3 – делитель светового пучка; 5,6 – расширители пучка; 8 – фотопластинка; 9 – объект)

Луч от лазера (1) с помощью полупрозрачного зеркала (3) делится на два луча. После расширителей (5,6) один из пучков, используется в качестве опоры, другой освещает объект (9). Результат интерференции волнового поля, отраженного от объекта и опорного пучка, регистрируется на фотопластинке (8).

На Рис. 2 показана фотография голографической установки. Обозначения элементов те же, что и на Рис. 1. На Рис. 3 показана керамическая фигурка, взятая в качестве объекта. Размер объекта $2,5$ см.

Записывались четыре голограммы с углами между опорным и объектным пучком 5, 10, 15 и 20 градусов.



Рис. 2. Голографическая установка

На Рис. 4 показан результат восстановления изображения из голограммы с помощью лазерного пучка. Лазерный пучок падает на голограмму (Рис. 4 слева), изображение (Рис. 4 справа) фиксируется на белом экране.



Рис. 3 Объект для записи голограммы

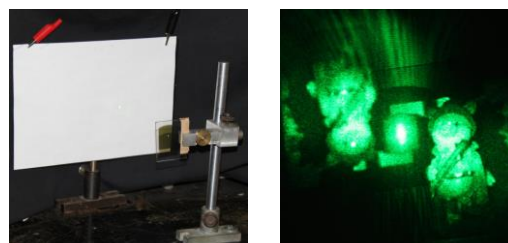


Рис. 4. Действительное и мнимое изображение, восстановленное из голограммы (слева схема восстановления, справа – восстановленное изображение)

III. РАСШИФРОВКА ГОЛОГРАММ ПРИ РАЗЛИЧНОМ РАЗМЕРЕ ОЦИФРОВАННОГО УЧАСТКА

На Рис. 5 показан результат сшивки 25 кадров (5 по оси X и 5 по оси Y). Физический размер оцифрованной голограммы – $10,8$ мм \times 5 мм.

Поскольку голограмма записывалась в области Фраунгофера, для восстановления использовалось преобразование Фурье [8, 9].

Результат восстановления при увеличении площади оцифрованной части голограммы показан на Рис. 6. Для ввода использовались микрообъективы с восьмикратным увеличением. Разрешение системы (размер одного пикселя) для всех изображений одинаково – 425 нм.



Рис. 5. Оцифрованная голограмма размером 25861×11690 точек

Для оцифровки использовалась голограмма, полученная при угле между интерферирующими опорным и объектным пучками 5 градусов (Рис. 1).

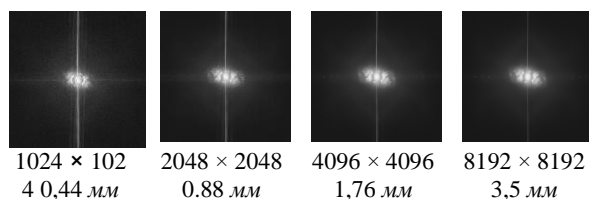


Рис. 6. Восстановленные на компьютере действительное и мнимое изображения объекта при различном размере оцифрованного участка голограммы

На Рис. 7 увеличенные изображения объекта (Рис. 3). Видно, что при увеличении площади оцифрованного участка зернистость уменьшается, увеличивается качество изображения.

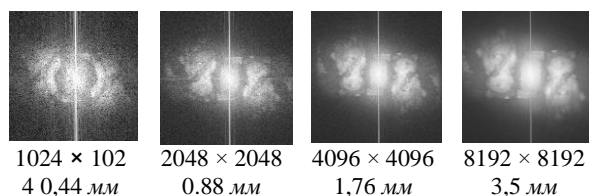


Рис. 7. Сравнение качества действительного и мнимого изображения объекта при различном размере участка голограммы

Этот же эффект получается при восстановлении изображения с физической голограммы при увеличении апертуры восстанавливающего пучка (Рис. 4).

При небольших углах между пучками качество восстановленных изображений снижается из-за перекрытия, мнимого и действительного изображения с центральным пучком.

IV. РАСШИФРОВКА ГОЛОГРАММ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ РАЗНЫХ УГЛАХ МЕЖДУ ОБЪЕКТНЫМ И ОПОРНЫМ ПУЧКАМИ

При увеличении угла между объектным и опорным пучком искажения, вызванные влиянием центрального пучка, снижаются, и качество восстановленного изображения увеличивается. Однако при этом размер полос на голограмме становится меньше и требуется большее разрешение.

Оцифровывались голограммы с углами между интерферирующими полосами $5, 10, 15$ и 20 градусов. Использовался микрообъектив с восьмикратным увеличением. Разрешение системы равно 425 нм. Размер оцифрованного кадра одинаков и равен 5184×3456 мм. Оцифрованный участок имеет физические размеры $2,2 \times 1,5$ мм.

Для восстановления изображения из голограммы использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье для произвольного количества точек. На Рис. 8 показаны восстановленные изображения из различных голограмм.

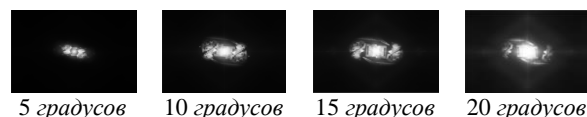


Рис. 8. Восстановленные на компьютере действительное и мнимое изображения объекта при различных углах между опорным и объектным пучками

Ниже показаны увеличенные участки восстановленных изображений.

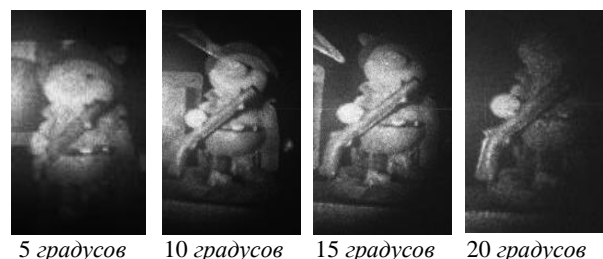


Рис. 9. Восстановленные на компьютере увеличенные участки при различных углах между опорным и объектным пучками

Видно, что хотя пучки и расходятся, но при оцифровке голограмм с углами 15 и 20 градусов, выбранного разрешения (425 нм) уже не хватает. В области высоких пространственных частот из-за недостатка разрешения пропадают детали изображения.

Для расшифровки голограмм, полученных при больших углах сдвига, необходимо увеличивать разрешение при оцифровке.

На следующем рисунке (Рис. 10) показаны увеличенные части восстановленного изображения из голограммы, полученной при 15 градусах между опорным и объектным пучками.

При оцифровке использовались микрообъективы с восьмикратным (разрешение 425 нм, Рис. 10 слева) и десятикратным увеличением (340 нм, Рис. 10 справа).

Видно, что правая часть изображения содержит элементы (прорисована левая рука), которые утеряны на изображении на левой части рисунка. Эти элементы соответствуют области высоких пространственных частот.

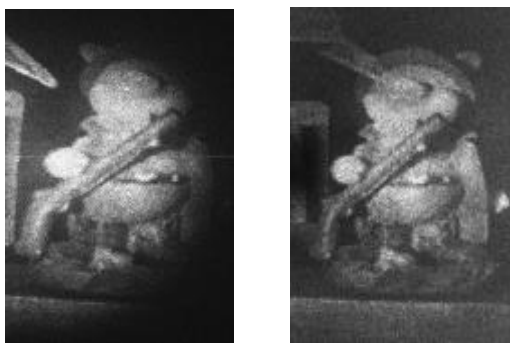


Рис. 10. Увеличенные части изображения при оцифровке с микрообъективами с восьмикратным и десятикратным увеличением

Для определения расстояния между пиками полос, образующимися в результате интерференции двух плоских пучков, используется следующее выражение

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin(\alpha / 2)}, \quad (1)$$

где λ - длина волны, монохроматического света, используемого для освещения, α - угол между интерферирующими пучками.

Выражение (1) используется для грубой оценки необходимого разрешения фотоматериалов, используемых для записи голограмм. Если использовать источник освещения с длиной волны $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$, то для угла 15 градусов $\Delta x = 2 \text{ мкм}$. По теореме Котельникова для обеспечения необходимого разрешения необходимо как минимум две точки на полосу, т. е. необходимое разрешение $\Delta x = 1 \text{ мкм}$. Однако эти рассуждения верны только для несущей частоты (при интерференции двух плоских волн). На самом деле разрешение должно быть на порядок больше. В нашем случае достаточное разрешение - 340 нм .

В. ВЫВОДЫ

В статье описана оптическая система для оцифровки голограмм, полученных классическим способом и зарегистрированных на фотопластинках.

При оцифровке с разрешением 425 нм угол между опорным и объектным пучками не может превышать 10 градусов . При разрешении 340 нм угол между пучками может быть не более 15 градусов .

Для повышения качества изображений, восстановленных из голограммы, необходимо увеличивать физический размер оцифрованной площади голограммы и тем самым увеличивать размер цифрового массива.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований «Разработка методов сверхразрешения в цифровой голографической интерферометрии» (Грант № 16-08-00565).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gabor, D. A new microscopic principle [Text] / D. Gabor // Nature. – 1948. – Vol. 161. – P. 777-778. (перевод в Дж. У. Струок, Введение когерентную оптику и голографию, М., «Мир», 1967, стр. 262—301).
- [2] Козачок А.Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике. М.: Машиностроение, 1984. 176 с.
- [3] Герасимов С.И., Гужов В.И., Жилкин В.А., Козачок А.Г. Автоматизация обработки интерференционных картин при исследовании полей деформаций // Заводская лаборатория. 1985. №4. С.77-80.
- [4] Ярославский, Л.П. Цифровая голография [Текст] / Л.П. Ярославский, Н.С. Мерзляков. – М.: Наука, 1982. – 219 с.
- [5] Kim, M.K. Principles and techniques of digital holographic microscopy [Text] / M.K. Kim // SPIE Reviews. – 2010. – Vol. 1. – P. 018005-1 – 018005-50.
- [6] Модификация оптических микроскопов / Гужов В.И., Ильтимиров Д.В., Хайдуков Д.С., Чернов О.В., Полубинский С.Л. // Автоматика и программная инженерия, Новосибирск, 2016. №2(16) С. 71–76.
- [7] Modification of Optical Microscopes / V.I. Guzhov, D.V. Iltimirov, D.S. Hajdukov, O.V.Chernov, S.L. Polubinskiy // Automatics & Software Enginery, Novosibirsk, - 2016.- No.2(16) , p.71-76.
- [8] Расширение поля зрения оптического микроскопа для регистрации аналоговых голограмм. / Гужов В.И., Ильиных С.П., Плешкевич А.А. // Сборник трудов XIII сборник трудов научно-практической конференции «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии». г. Сочи, – М: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2016. – с. 221-224.
- [9] Область возможного применения дискретных преобразований Фурье и Френеля. / Гужов В.И., Емельянов В.А., Хайдуков Д.С. // Автоматика и программная инженерия, Новосибирск, 2016. №1(15). С. 97–103.
- [10] The Area of Possible Application of Discrete Fourier transform / V.I. Guzhov, V.A. Emelyanov, D.S. Hajdukov // Automatics & Software Enginery, Novosibirsk. 2016. N. 1(15) , p.97-103.
- [11] Представление преобразования Френеля в дискретном виде. / Гужов В.И., Несин Р.Б., Емельянов В.А. // Автоматика и программная инженерия, Новосибирск. 2016. №1(15) С. 91–96.
- [12] Presentation of Fresnel Transform in the Discrete Form / V.I. Guzhov, R.B. Nesin, V.A. Emelyanov // Automatics & Software Enginery, Novosibirsk, - 2016.- No.1(15) , p.91-96.

Image Recovery from the Real Hologram Recorded on Photographic Plates

V.I. GUZHOV, E.N. DENEGKIN,
O.V. CHERNOV, N.S. ZARUBIN

Abstract: Holographic systems can measure the profile of objects with a diffuse surface with high accuracy. Due to the superposition of the object wave and the reference wave, is formed by the interference pattern, which is recorded on a photosensitive plate. To separate the overlapping beams is used optical circuits, which provide large (about 30 degrees)

angles between the object and reference waves. In this case, the step of interference fringes less than 1 micron. In this case, a step of interference fringes becomes less than 1 mm. The article describes a system for the digitization of real holograms on the basis of an optical microscope and the restoration images to determine the appropriate resolution for the development of digital holographic systems.

Key words holography, image processing, interference, digital holography

REFERENCES

- [1] Gabor, D. A new microscopic principle [Text] / D. Gabor // Nature. – 1948. – Vol. 161. – P. 777-778.
- [2] Kozachok A.G. Golograficheskie metody issledovaniya v jeksperimental'noj mehanike. M.: Mashinostroenie, 1984. 176 s.
- [3] Gerasimov S.I., Guzhov V.I., Zhilkin V.A., Kozachok A.G. Avtomatizacija obrabotki interferencionnyh kartin pri issledovanii polej deformacij// Zavodskaja laboratorija.-1985.- №4.-S.77-80.
- [4] Jaroslavskij, L.P. Cifrovaja golografija [Tekst] / L.P. Jaroslavskij, N.S. Merzljakov. – M.: Nauka, 1982. – 219 s.
- [5] Kim, M.K. Principles and techniques of digital holographic microscopy [Text] / M.K. Kim // SPIE Reviews. – 2010. – Vol. 1. – P. 018005-1 – 018005-50.
- [6] Modification of Optical Microscopes / V.I. Guzhov, D.V. Iltimirov, D.S. Hajdukov, O.V.Chernov, S.L. Polubinskiy // Automatics & Software Engineering, Novosibirsk. - 2016.- No.2(16) , p.71-76.
- [7] Rasshirenie polja zrenija opticheskogo mikroskopa dlja registracii analogovyh gologramm. / Guzhov V.I., Il'inyh S.P., Pleshkevich A.A. // Sbornik trudov XIII sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferencii «Innovacionnye, informacionnye i kommunikacionnye tehnologii». g.Sochi, – M: Associacija vypusnikov i sotrudnikov VVIA im. prof. Zhukovskogo, 2016. s. 221-224.
- [8] The Area of Possible Application of Discrete Fourier transform / V.I. Guzhov, V.A. Emelyanov, D.S. Hajdukov // Automatics & Software Engineering, Novosibirsk. 2016. No.1(15) , p.97-103.
- [9] Presentation of Fresnel Transform in the Discrete Form / V.I. Guzhov, R.B. Nesin, V.A. Emelyanov // Automatics & Software Engineering, Novosibirsk. 2016. No.1(15). p.91-96.



Владимир Гужов – профессор кафедры ССОД Новосибирского Государственного Технического университета, доктор технических наук. Имеет более 200 научных работ. Область научных интересов: высокоточные интерференционные измерения, безошибочные вычисления, теория чисел.
[e-mail: vig@nstu.edu.ru](mailto:vig@nstu.edu.ru)



Олег Чернов – инженер. Область научных интересов: стабилизация лазерного излучения, цифровая голография, автоматизация научных исследований.



Евгений Денежкин – доцент Новосибирского государственного технического университета, кандидат технических наук. Область научных интересов: голографические измерительные системы



Никита Зарубин – магистр 1 курса. Область научных интересов: информационно-измерительные системы.