

УДК 535.8 004.93

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОСЕНСОРОВ НА КАЧЕСТВО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ ФРЕНЕЛЯ

© 2013 П.А. Черёмхин

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, г. Москва

Поступила в редакцию 26.11.2013

В данной статье приведено результаты по оценке влияния характеристик регистрирующих фотосенсоров (количества и размера пикселя, временных и пространственных шумов, радиометрических параметров) на качество восстановления изображений с цифровых голограмм Френеля. Проведено сравнение численных методов восстановления изображений с цифровыми голограммами Френеля и улучшения их качества. Используя созданную экспериментальную установку, записаны цифровые голограммы и проверены расчётные оценки предельных параметров регистрируемых объектов, результаты сравнения методов. Измерены радиометрические и шумовые характеристики фото- и видеокамер различного типа. Проанализировано их влияние на отношение сигнал/шум в цифровых голограммах и восстановленных изображениях, получены расчётные зависимости и экспериментальные оценки.

Ключевые слова: цифровая голография, фотосенсор, голограмма Френеля, временные шумы, пространственные шумы.

1. ВВЕДЕНИЕ

Понятие “цифровая голография” включает в себя регистрацию интерференционной картины от объектной и опорной волн на цифровой фоторегистратор в виде матрицы чисел, методы математической реконструкции и преобразования зарегистрированных волновых полей, а также цифровую пост-обработку голограмм перед их использованием. Полученная таким образом голограмма называется “цифровой” [1]. Среди недостатков и ограничений цифровой голографии наиболее фундаментальным является размер и количество пикселей камер. Также недостатками являются недостаточная точность и ресурсоёмкость методов численного восстановления, необходимость пространственного разделения полезного порядка дифракции с нежелательными, наличие спеклов, ограниченность динамического диапазона и наличие шумов камер. Проблематика влияния шумов и радиометрических характеристик на качество восстановления изображений с цифровых голограмм особенно слабо освещена в литературе, в отличие от аналогичных параметров регистрирующих сред в аналоговой голографии (например, [2-3]).

Таким образом, целью работы являлось получение расчётных и экспериментальных оценок влияния характеристик (количества и размера пикселей, временных и пространственных шумов, радиометрических характеристик) фотосенсоров регистрирующих камер на качество восстановления изображений с цифровых голограмм Френеля.

Черёмхин Павел Аркадьевич, ассистент кафедры лазерной физики. E-mail: cheremhinpavel@mail.ru

2. ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ РЕГИСТРИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ И СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ И ЧИСЛЕННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Систематизированы и дополнены оценки параметров регистрируемых объектов при записи цифровых голограмм [4]. В качестве оцениваемых параметров выбраны максимальный поперечный размер голографируемого объекта L и размер элемента разрешения объекта Δx , которые определяют число отсчётов на объекте $M = L / \Delta x$ в поперечном направлении. Исходными параметрами являлись размер элемента разрешения голограммы Δh (размер пикселя фоторегистратора), число отсчётов голограммы $N \times N$, расстояние от голограммы до ближайшей точки объекта z , длина волны излучения λ . Для схемы записи с наклонным пучком получены оценки для случаев допущения (выражение (1)) и недопущения циклического сдвига порядков дифракции (выражение (2)) на численно восстановленном поле:

$$L \leq \frac{\lambda \cdot z}{2 \cdot \Delta h} - \frac{3}{2} N \cdot \Delta h, M \leq \frac{N}{2} \left(1 - 3 \frac{N \cdot (\Delta h)^2}{\lambda \cdot z} \right),$$

$$\Delta x = \frac{\lambda \cdot z}{N \cdot \Delta h}, \quad (1)$$

$$L \leq \frac{\lambda \cdot z}{2 \cdot \Delta h} - N \cdot \Delta h, M \leq \frac{N}{2} \left(1 - 2 \frac{N \cdot (\Delta h)^2}{\lambda \cdot z} \right),$$

$$\Delta x = \frac{\lambda \cdot z}{N \cdot \Delta h}. \quad (2)$$

При записи цифровых голограмм Френеля в случае использовании схемы с осевыми пучками и реализацией метода фазовых шагов ограничения на параметры голографируемой объёмной сцены имеют такой вид:

$$L \leq \frac{\lambda \cdot z}{\Delta h} - N \cdot \Delta h, M \leq N \left(1 - \frac{N \cdot (\Delta h)^2}{\lambda \cdot z} \right),$$
$$\Delta x = \frac{\lambda \cdot z}{N \cdot \Delta h}. \quad (3)$$

С использованием теории зон Френеля получены оценки размера и числа отсчётов регистрируемых объектов в продольном направлении.

Проведено сравнение различных методов численного восстановления изображений с цифровых голограмм Френеля [5]. При численном моделировании использовались диффузные объекты, отличающиеся по линейным размерам до 4 раз, расстояние между объектом и голограммой варьировалось в 100 раз, число отсчётов голограммы от 512×512 до 2048×2048 . Получено, что наилучшим по критерию наименьшего нормированного среднеквадратического отклонения [6] восстановленного изображения объекта от оригинала является метод прямого расчёта дифракции Френеля (ПР) [7].

Проведено сравнение методов улучшения качества восстановленных изображений путём подавления нежелательных дифракционных порядков: фильтрация в пространственной плоскости вычитанием из голограммы её среднего значения (СЗ), средних значений по группам элементов голограммы, значений, полученных медианной фильтрацией голограммы (МФ); фильтрация в частотной плоскости выбором области обнуления частот (ВО), обнулением частот по порогу (ОЧП), вычислением лапласиана, использованием оконного фильтра ($\text{ОФ}_1, \text{ОФ}_2$); нелинейная фильтрация по квадрантам в частотной плоскости. Методы ВО, МФ, ОЧП, ОФ_1 и СЗ показали наилучшие результаты в серии численных экспериментов.

Экспериментальная проверка полученных расчётных оценок и результатов сравнения методов численного восстановления и улучшения качества восстановления изображений описывается в следующей главе.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЗАПИСЬ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ ФРЕНЕЛЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ

Создана экспериментальная установка для записи цифровых голограмм Френеля “плоских” объектов и объёмных сцен [7]: а) источник излучения - неодимовый лазер с длиной волны 532 нм длиной когерентности 50 м мощностью 50 мВт, б) число отсчётов в голограммах до 2048×2048 , элемент разрешения голограммы – $3,5 \div 11,4$ мкм в зависимости от камеры, в) расстояние от объек-

та до голограммы – $200 \div 1400$ мм. Записаны цифровые голограммы, проведено численное восстановление изображений различными методами. Как и при моделировании, метод ПР показал наилучшие результаты, поэтому он использовался при дальнейших экспериментах. Проведено сравнение методов фильтрация от нежелательных порядков дифракции – лучшие результаты показали методы ВО и ОФ_1 .

Проведена экспериментальная проверка оценок параметров регистрируемых на голограммы объектов [4]. Полученные результаты свидетельствуют о правильности зависимостей для ограничений поперечных размеров объектов при допущении и недопущении циклического сдвига порядков дифракции. Также получено согласие величин поперечного и продольного пространственного разрешения в восстановленных изображениях с расчётными. Так, на восстановленном изображении миры разрешаются поперечные элементы с размером $0,12 \pm 0,02$ мм (расчёт - 0,12 мм), а размер отчёта в продольном направлении составляет $12 \pm 0,5$ мм (расчёт - 12 мм).

Экспериментальная установка модернизирована для записи цифровых голограмм в монохроматическом пространственно-некогерентном излучении. Период интерференционных полос составлял 10 пикселей. Численно восстановлены изображения с полученных голограмм.

Проведены эксперименты по динамическому отображению объёмных сцен с помощью видео-последовательностей цифровых голограмм численно и оптически [7]. Голограммы регистрировались при освещении лазерным излучением с длиной волны 532 нм, а восстанавливались излучением лазера с длиной волны 633 нм. Частота смены кадров составляла 2 Гц.

Таким образом, в разделе 3 получены расчётные и экспериментальные результаты по оценке влияния количества пикселей и пространственного разрешения фотосенсоров камер на качество восстановления изображений с цифровых голограмм. Это позволило перейти к исследованию влияния следующих основных характеристик фотосенсоров: временных и пространственных шумов, радиометрических параметров.

4. ИЗМЕРЕНИЕ ШУМОВЫХ, РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТО- И ВИДЕОКАМЕР

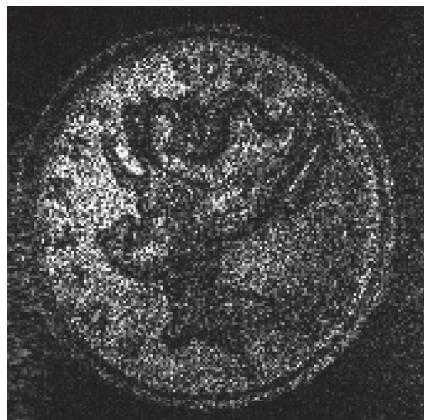
Измерены радиометрические характеристики, временные и пространственные шумы камер 4 типов: бытовой камеры Canon EOS 400D, научной измерительной камеры MegaPlus II ES11000, камеры технического зрения PixeLink PL-B781F и камеры видеонаблюдения с аналоговым выходом Watec LCL-902C. Для всех камер полученные радиометрические функции линейны на большей части динамического диапазона.

Разработаны и экспериментально проверены методики для измерения характеристик камер [8]. Методика измерения временных шумов позволяет по результатам съёмки одной сцены измерять временные шумы для всех уровней сигнала фотосенсора. Экспериментально показано, что достаточно съёмки только 2 кадров сцены. Методика измерения пространственных шумов отличается пониженными требованиями к пространственной однородности освещения, что позволило измерить неоднородности чувствительности в 3-6 раз меньшие неоднородности используемого освещения.

Предложена методика измерения спектральных характеристик фотосенсоров, снабжённых массивом цветных фильтров Байера, использующая извлечение линейных данных из пикселей фотосенсора и апробирована на трёх камерах: Canon EOS 1000D, Nikon D50 и Nikon D90 [9]. Предложено использование спектральных характеристик цветовых каналов камер для одновременной записи одной камерой трёх голограмм излучением трёх длин волн.

Разработана оригинальная модификация методики нахождения портрета световых пространственных шумов фотосенсоров [10]. Методику отличает способ создания освещения, адаптивный к конструкции камеры, и улучшенный метод удаления темновых шумов. С её помощью получен портрет световых пространственных шумов (с погрешностью $15 \div 20\%$) для экземпляра камеры Canon EOS 400D. С использованием измеренного портрета проведён эксперимент по идентификации экземпляра камеры по 9 снимкам, сделанным различными камерами. Минимальное отношение коэффициентов корреляции свой снимок / чужой снимок составило 60.

Все параметры, из числа предоставляемых производителями камер, совпадали с полученными в пределах погрешности измерений. Эти результаты позволили перейти к анализу влияния шумов и радиометрических характеристик фотосенсоров на качество восстанавливаемых изображений.



5. ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ И ЕГО УВЕЛИЧЕНИЕ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЦИФРОВЫМИ ГОЛОГРАММАМИ

Разработана методика моделирования снимка цифровой камерой с учётом измеренных в разделе 4 характеристик камер [11]. С использованием методики получены расчётные оценки отношения сигнал/шум (ОСШ [12]) в регистрируемых изображениях, в том числе цифровых голограммах, при однократной экспозиции. Результаты, полученные при моделировании с использованием камеры MegaPlus II ES11000, хорошо согласуются с расчётными.

Получено, что при заданном соотношении средней интенсивности объектного и опорного пучков и полном использовании линейного динамического диапазона сенсора, ОСШ в изображениях, восстановленных с голограммой, зависит только от шумов камеры и площади регистрируемого диффузного объекта, нормированной на площадь восстановленного поля. Для случаев однократной и многократной экспозиций получены выражения, описывающие данную зависимость. Эти результаты базируются на оценках ОСШ в регистрируемых изображениях, экспериментально проверенных с помощью камеры MegaPlus II ES11000. Результаты численных экспериментов согласуются с полученной зависимостью. Проведено качественное сравнение результатов моделирования с характеристиками реальных цифровых голограмм, записанных камерами MegaPlus II ES11000 и Watec LCL-902C (см. рис. 1).

Видно, что качество восстановления изображения объекта с голограммой, записанной камерой MegaPlus II ES11000, превосходит результат восстановления голограммы, зарегистрированной камерой Watec LCL-902C. Это согласуется с тем, что шумовые и радиометрические характеристики камеры MegaPlus II ES11000 лучше, чем у камеры Watec LCL-902C [11].

Предложено использование пространственного усреднения для увеличения ОСШ в снимках и восстановленных изображениях [13]. По-

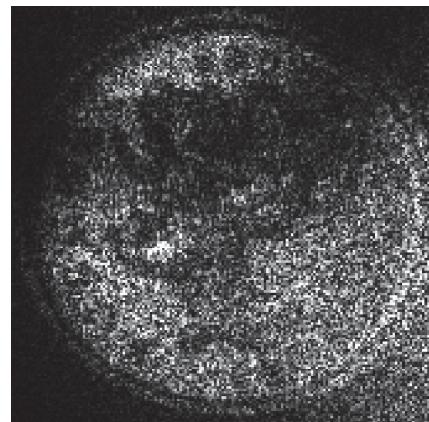


Рис. 1. Изображения объекта, восстановленные с цифровых голограмм размером 512×512 отсчётов, записанных камерами MegaPlus II ES11000 (а) и Watec LCL-902C (б)

лучены расчётные оценки и выполнена экспериментальная проверка их обоснованности. Так, при использовании одиночной экспозиции с пространственным усреднением по 16 пикселям экспериментально получено увеличение ОСШ в снимках в $3,9 \pm 0,4$ раза (при расчётном 4).

Разработан метод увеличения ОСШ в снимках и в восстановленных с голограмм изображениях за счёт компенсации пространственных шумов с помощью их портретов [10]. Получены расчётные оценки увеличения ОСШ и выполнена экспериментальная проверка их обоснованности.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены следующие основные результаты и выводы:

- систематизированы, дополнены и экспериментально подтверждены оценки размеров и разрешения объектов, регистрируемых цифровой голограммой Френеля, от количества и размеров элементов сенсора;
- отобраны лучшие методы численного восстановления изображений и подавления неинформативных порядков дифракции;
- разработаны и экспериментально апробированы 4 методики измерения шумовых и спектральных характеристик фотосенсоров;
- получены и подтверждены аналитические зависимости ОСШ в восстановленных с цифровых голограмм Френеля изображениях диффузных объектов от их размеров и характеристик фотосенсора;
- разработаны и экспериментально обоснованы 2 метода увеличения ОСШ в восстановленных с цифровых голограмм изображениях.

Применённые в работе подходы и полученные результаты могут быть использованы, например, для обоснованного выбора типа цифровой камеры при решении научных и прикладных задач с использованием цифровой голограммы. Разработанные методы увеличения отношения сигнал/шум могут быть использованы не только для повышения качества восстановленных с цифровых голограмм изображений, но и при регистрации произвольных пространственных световых распределений, в том числе сфокусированных изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Juptner W., Schnars U. Digital Holography.* Berlin: Springer, 2005, 164 p.
2. Чураев А.Л. Стаселько Д.И. Рассеяния света галоидосеребряными фотоматериалами для голограмм. Индикатрисы рассеяния света на микрокристаллах и поверхности рельефе эмульсии // Опт. и спектр. 1986. Т. 61. № 3. С. 591-597.
3. Стаселько Д.И., Чураев А.Л. Рассеяния света галоидосеребряными материалами для голограмм. Влияние голограмм шумов и спеклограмм // Опт. и спектр. 1986. Т. 61. № 4. С. 828-834.
4. Запись и численное восстановление цифровых голограмм Френеля / С.Н. Стариков, П.А. Черёмхин, В.В. Краснов // Вестник РУДН, Серия "Математика. Информатика. Физика". 2011. № 4. С. 113-123.
5. Numerical and optical reconstruction of digital off-axis Fresnel holograms / N.N. Evtikhiev, S.N. Starikov, P.A. Cheryomkhin, V.V. Krasnov, V.G. Rodin // Proceedings of SPIE. 2012. Vol. 8429. P. 84291M.
6. Fienup J.R. Invariant error metrics for image reconstruction // Appl. Opt. 1997. Vol. 36. No. 32. P. 8352-8357.
7. Juptner W., Schnars U. Digital recording and reconstruction of holograms in hologram interferometry and shearography // Appl. Opt. 1994. Vol. 33, Issue 20. P. 4373-4377.
8. Оценка влияния динамического диапазона и шумов регистрирующих камер на качество цифровых голограмм / Н.Н. Евтихьев, С.Н. Стариков, П.А. Черёмхин // Оптический журнал. 2013. Т. 80, № 5. С. 53-64.
9. Методика измерения спектральных характеристик матричных приемников любительских и профессиональных фотокамер и их применение для задач цифровой голограммии / В.В. Лесничий, Н.В. Петров, П.А. Черёмхин // Опт. и спектр. 2013. Т. 115. № 4. С. 99-109.
10. Получение портрета световых пространственных шумов фотосенсора камеры для идентификации цифровых камер и увеличения отношения сигнал/шум при регистрации изображений / Н.Н. Евтихьев, С.Н. Стариков, П.А. Черёмхин, О.А. Яцунко // Наукомёжкие технологии. 2013. № 7. С. 55-64.
11. Evtikhiev, N. N. Measurement of noises and modulation transfer function of cameras used in optical-digital correlators / N.N. Evtikhiev, S.N. Starikov, P.A. Cheryomkhin, V.V. Krasnov // Proceedings of SPIE. 2012. Vol. 8301. P. 830113.
12. Оптическая голограмма / Р. Коллер, К. Беркхарт, Л. Лин. М.: Мир, 1973. 698 с.
13. Увеличение отношения сигнал/шум за счёт пространственного усреднения при регистрации изображений / Н.Н. Евтихьев, В.В. Краснов, В.Г. Родин, И.В. Солякин, С.Н. Стариков, П.А. Черёмхин, Е.А. Шапкарина // Вестник РУДН, Серия "Математика. Информатика. Физика". 2012. № 4. С. 122-136.

EFFECT OF PHOTODRUM CHARACTERISTICS ON RECONSTRUCTION QUALITY OF DIGITAL FRESNEL HOLOGRAM

© 2013 P.A. Cheremkhin

National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow

In this article results of estimation of effect of photosensor characteristics (quantity and size of pixels, temporal and spatial noises, radiometric parameters) on reconstruction quality of digital Fresnel holograms are shown. Comparisons of methods of numerical digital Fresnel holograms reconstruction and improving of their quality are obtained. Using experimental setup digital holograms are recorded; estimations of limiting parameters of objects and comparison of methods are verified. Radiometric and noise characteristics of photo- and videocameras of different types are measured. Effect of these parameters on signal-to-noise ratio of digital holograms and reconstructed images is analysed. Calculated and experimental evaluation are obtained.

Key words: digital holography, photosensor, Fresnel hologram, temporal noise, spatial noise.