

Согласование масштабов при записи, обработке и воспроизведении цифровых голограмм

А.О. Негриенко, В.В. Кабанов

*Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск;
e-mail: a.nehryienka@dragon.bas-net.by*

В работе теоретически обоснован метод эффективного управления волновым фронтом лазерного пучка в режиме точного согласования масштабов интерференционной картин. Условие согласования масштабов цифровых голограмм экспериментально подтверждено на голографической установке, работающей по замкнутому цикл. Найден простой способ экспериментального согласования масштабов, практически без детализации учитывающий суммарный коэффициент масштабирования, k с высокой точностью. Реализовано высокоточное согласование масштабов цифровых голограмм с погрешностью коэффициента масштабирования в 7-м знаке после запятой.

Ключевые слова: лазерный пучок, управления волновым фронтом, интерференционная картина, коэффициент масштабирования.

Введение

Голографический процесс осуществляется посредством записи интерференционной картины (ИК) взаимодействующих объектного и опорного пучков лазерного излучения (ЛИ) и последующего восстановления одного из них. Записанная ИК является голограммой, с помощью которой возможно с высокой точностью воспроизводить один из исходных пучков. В традиционной голографии при записи и восстановлении информации голограмма сохраняет свое положение, а восстановление исходных пучков ЛИ требует использования оригинальной голограммы, или её точной копии. Любые изменения записанного узора ИК приводят к потере возможности точного восстановления исходных пучков ЛИ. Причем, характеристики голограммы (такие как масштаб, форма и качество ИК) остаются неизменными, что с одной стороны не вносит дополнительных проблем, а с другой, не позволяет управлять этими характеристиками.

С развитием цифровых технологий открывается широкая перспектива управления пространственно-временным контентом оцифрованных голограмм. В работе рассмотрено согласование масштабов исходной и повторно воспроизводимой голограмм – ключевое условие эффективной реализации голографической системой (ГС) цифрового управления волновым фронтом лазерного излучения (ВФЛИ) методом адаптивной цифровой голографии. ГС работает по замкнутому циклу с обратной связью и включает в себя цифровую камеру (ЦК), пространственный модулятор света (ПМС), и микропроцессор (компьютер) со специальным программным обеспечением по цифровой обработке интерференционных картин (ИК).¹

Теоретическое обоснование

Запись интерференционной картины на ЦК, последующая компьютерная обработка и восстановление исходного светового пучка с требуемыми характеристиками на модифицированной голограмме, воспроизведенной на ПМС, требует чрезвычайно

¹ Подробнее см. данные Матер.: Управление волновым фронтом лазерного пучка методом адаптивной цифровой голографии, А.О. Негриенко, В.В. Кабанов.

точного согласования всех узлов такой голографической установки (ГУ) [1, 2]. Но даже самое тщательное исполнение отдельных модулей и отладка ГУ в целом не гарантируют получение идеального результата – всегда будут присутствовать погрешности технологий при производстве отдельных модулей, неточности при наладке и юстировке, и, наконец, различные сопутствующие эффекты, в том числе оптические при эксплуатации ГС. Вместе с тем корректное использование метода голографического управления волновым фронтом ЛИ требует, чтобы масштаб ИК цифровой голограммы (ЦГ), оттранслированной для повторного воспроизведения на дисплее ПМС, совпадал с пространственным масштабом цифровой голограммы, формирующей исходный лазерный пучок.

На различных этапах циклической обработки при записи, трансляции и воспроизведении ЦГ на отдельных цифровых модулях ГС ее характеристики могут изменяться в силу различных причин. В рассматриваемой ГС к ним можно отнести: несовпадение углов схождения опорного и объектного пучков на ПМС и ЦК, изменение масштаба ИК объективом ЦК, различие масштабов дискретизации - размеров пикселей на матрицах ПМС и ЦК.

Масштаб ИК можно характеризовать ее реальным периодом на соответствующем этапе прохождения по циклу обратной связи. Период ИК исходно-сгенерированной голограммы на ПМС составляет

$$d_1 = \lambda / [2\sin(\frac{\vartheta_1}{2})] \quad (1)$$

для опорного лазерного пучка с длиной волны λ , воспроизводящего под углом ϑ_1 объектный пучок. При несовпадении угла ϑ_1 с углом ϑ_2 , период d_2 , формируемой в передней плоскости объектива ЦК интерференционной картины, будет равен

$$d_2 = d_1 [\sin(\vartheta_1/2) / \sin(\vartheta_2/2)]. \quad (2)$$

Период интерференционной картины, спроецированной объективом и записанной на матрице ЦК, составит:

$$d_3 = \Gamma \cdot d_2, \quad (3)$$

где Γ – коэффициент увеличения (уменьшения) объектива [3].

Поскольку размер пикселя на матрице ЦК, h_{CCD} , может отличаться от размера пикселя на матрице ПМС, h_{SLM} , то при непосредственно попиксельной передаче на ПМС период интерференционной картины, оцифрованной на ЦК, изменится в (h_{SLM} / h_{CCD}) раз:

$$d_4 = d_3 \cdot (h_{SLM} / h_{CCD}). \quad (4)$$

С учетом формул (1 – 4) суммарный коэффициент масштабирования при воспроизведении интерференционной картины на пространственном модуляторе света составит:

$$k = d_1 / d_4 = [h_{CCD} \sin(\vartheta_2/2) / \Gamma h_{SLM} \sin(\vartheta_1/2)]. \quad (5)$$

В итоге, для реализации корректной работы голографической системы в целом, на этапе цифровой обработки интерференционной картины оцифрованной голограммы требуется выполнить условие согласования масштабов оттранслированной d'_1 и исходной d_1 голограмм, которое можно представить в виде:

$$d_1 = d'_1 = \hat{\mathbf{M}}^{-1}d_4, \quad (6)$$

где $d_4 = \hat{\mathbf{M}}d_1$, а $\hat{\mathbf{M}}$, $\hat{\mathbf{M}}^{-1}$ – операторы трансформирования и модификации масштаба, соответственно. Собственное значение оператора модификации $\hat{\mathbf{M}}^{-1}$ для описанной выше трансформации будет равно суммарному коэффициенту масштабирования k , определяемому по формуле (5). При этом цифровая модификация (изменение) масштаба d_4 , трансформированной интерференционной картины для последующей трансляции и воспроизведения на пространственном модуляторе света с масштабом d'_1 осуществляется согласно соотношению (6) с помощью программной передискретизации изображения [4].

Экспериментальная реализация

В эксперименте с двумя коллимированными пучками лазерного излучения на голографической установке была записана и воспроизведена ЦГ на дисплее ПМС без согласования (при прямой попиксельной трансляции ЦГ на ПМС) и с согласованием пространственных масштабов методом программной передискретизации изображения ИК. Результаты представлены на рис. 1. Экспериментальная апробация демонстрирует, что найденный метод согласования пространственно-угловых масштабов (определение отношения периода исходной ИК d_1 к периоду трансформированной ИК d_4 , с последующей передискретизацией ИК с масштабом d'_1) позволяет воспроизвести пучок лазерного излучения, хорошо совпадающий с исходным пучком. Найден простой способ экспериментального согласования масштабов, практически, без детализации, учитывающий суммарный коэффициент масштабирования, k с высокой точностью, что позволяет эффективно компенсировать многие из названных выше погрешностей. Реализовано высокоточное согласование масштабов цифровых голограмм с погрешностью коэффициента масштабирования в 7-м знаке после запятой.

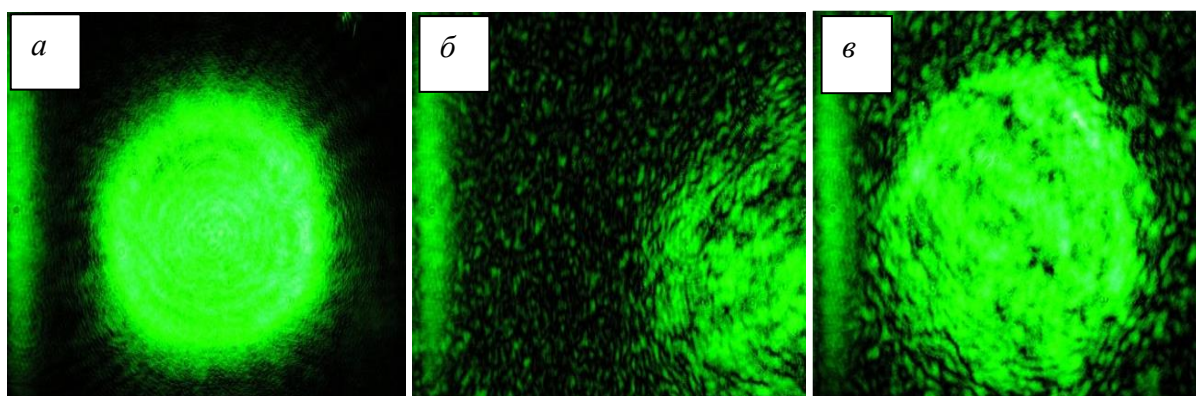


Рис. 1. Фотографии поперечного сечения (а) исходного коллимированного пучка, (б) пучка, восстановленного без согласования масштабов и (в) пучка, восстановленного с согласованием масштабов воспроизводимой интерференционной картины.

Заклучение

Теоретически обосновано, что точное согласование масштабов при записи, обработке и воспроизведении цифровых голограмм является необходимым и достаточным условием, гарантирующим реализацию высокоэффективного управления волновым фронтом лазерных пучков методом адаптивной цифровой голографии. Условие согласования масштабов цифровых голограмм экспериментально подтверждено на голографической установке, работающей по замкнутому циклу с использованием цифровой камеры, пространственного модулятора света и микропроцессора со специальным программным обеспечением по цифровой обработке интерференционных картин (ИК). Найден простой способ экспериментального согласования масштабов, практически без детализации учитывающий суммарный коэффициент масштабирования k с высокой точностью. Реализовано высокоточное согласование масштабов цифровых голограмм с погрешностью коэффициента масштабирования в 7-м знаке после запятой.

Литература

1. Residori S., Bortolozzo U., Dolfi D., Huignard J-P, Molin S., and Peigner A. Enhanced phase measurements from self-adaptive holography. SPIE Newsroom 2015, 10.1117/2.1201508.006057, P. 1–3.
2. Antier M., Larat C., Lallier E., Bourderionnet J., Primot J., Brignon A. Digital holography for coherent fiber beam combining with a co-propagative scheme. Optics Express. 2014, Vol. 22, No. 19, P. 7–10.
3. Яштолд-Говорко В. А. Фотосъёмка и обработка. Изд. 2-е. М.: Изд. «Искусство», 1965. 495 с.
4. Burger W., Burge M. J. Principles of Digital Image Processing, Core Algorithms. Springer-Verlag London Limited, 2009. 341 s.

Coordination of scales for recording, processing and reproduction of digital holograms

A.O. Negrienko, V.V. Kabanov

*B.I. Stepanov Institute of Physics, NAS of Belarus, Minsk;
e-mail: a.nehryienka@dragon.bas-net.by*

The paper theoretically substantiates a method for effective control of the wave-front of a laser beam in the mode of exact matching of the scales of interference patterns. The condition for matching the scales of digital holograms was experimentally confirmed on a holographic installation operating in a closed cycle. A simple method of experimental scaling has been found that takes into account the total scaling factor, k , with a high accuracy, practically without detailing. High-precision matching of digital holograms scales with the scaling factor error in the 7th decimal place has been implemented.

Keywords: laser beam, wave-front control, interference pattern, scaling factor.