

УДК 535.41:778.38

ГОЛОГРАФИЯ ДЕНИСЮКА НА ОСНОВЕ БЕСЩЕЛЕВОГО МЕТОДА

Ю.Х. Исманов, Н.М. Кулмурзаев, Т.Д. Тыншыова

Рассмотрена возможность получения голограммы, обладающей свойствами наиболее известных голограмм, таких как бентоновские и габоровские голограммы и голограмма Денисюка. Базовым методом записи подобной голограммы является бесщелевой метод записи радужных голограмм. Рассмотрены результаты экспериментов по восстановлению полученных голограмм белым и когерентным излучениями.

*Ключевые слова:* голограммы Габора, Бентона и Денисюка; бесщелевая радужная голография; метод Габо-ра; проекционное изображение; интерферограмма.

DENISYUK'S HOLOGRAPHY ON THE BASE OF SLITLESS METHOD

Y.Kh. Ismanov, N.M. Kulmurzaev, T.D. Tynyshova

The article regards the possibility of obtaining a hologram possessing the properties of the most famous holograms, such as the Benton and Gabor holograms and the Denisyuk hologram. The basic method for recording such a hologram is the slitless method of rainbow hologram recording. The results of experiments on the reconstruction of the obtained holograms by white and coherent radiation are considered.

*Keywords:* holograms of Gabor; Benton and Denisyuk; slitless rainbow holography; Gabor method; projection image; interferogram.

**Введение.** С точки зрения схемы записи голограмма Денисюка имеет особенность, которая отличает ее от других голограмм [1]. Важнейшим отличием данного типа голограмм является то, что при записи объектная и опорная световые пучки направляются на записывающий носитель с противоположных сторон. Подобные голограммы относят к классу толстослойных или отражательных голограмм. При записи любых других голограмм опорный и объектный пучки направляются на записывающий носитель с одной стороны. Подобные голограммы относят к классу тонкослойных или поверхностных голограмм. Известен ряд работ [2–6], посвященных проблеме получения голограммы, объединяющей свойства габоровских и бентоновских голограмм на основе внеосевой схемы записи. Удачное решение этой задачи показало целесообразность объединения указанных голограмм с голограммой Денисюка, т. е. возможность объединения тонкослойной и толстослойной голограмм. Теоретический анализ показал, что такая возможность существует на основе бесщелевого метода записи радужных голограмм [2].

**Голограмма Денисюка в радужной голографии.** В рассмотренном ниже эксперименте было предложено дополнить схему записи на основе

встречных пучков осевым методом Габора (рисунок 1).

Опорная световая волна, обозначенная на рисунке 1 как  $A$ , пропускается сквозь толстослойную среду  $H$  и освещает записываемый объект  $O$ . В отраженном от объекта свете обычно присутствуют зеркальная и диффузная составляющие. В этом случае, в соответствии с методом Габора, световая волна, отраженная объектом  $O$ , представляется в виде суммы [7]:

$$\begin{aligned} \vec{a}(x, y) &= \vec{a}_0 + \vec{a}_1(x, y) = \\ &= \vec{a}_0 \exp(-i\varphi_0) + \vec{a}_1(x, y) \exp(-i\varphi(x, y)), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $a_0$  и  $a_1$  представляют собой зеркальную и диффузную составляющие световой волны, которая отразилась от объекта  $O$ .

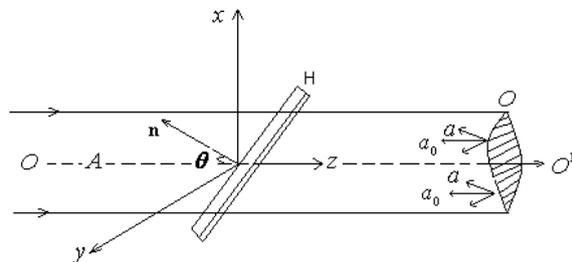


Рисунок 1 – Объединение методов Габора и Денисюка

Опорную волну  $H$ , которая падает слева на фотопластинку, запишем как  $A = A \exp(i\psi)$ , а свет, который освещает фотопластинку справа, представим как  $a(x, y)$ . Причем  $\bar{a}_0 = a_0 \exp(-i\varphi_0)$ , представляющую собой зеркальную составляющую, можно рассматривать как вторую опорную волну, а  $\bar{a}_1 = a_1 \exp(-i\varphi_1)$  – диффузную составляющую – как объектную волну. Наблюдение изображений, восстановленных с голограммы, удобнее всего осуществлять, поместив фотопластинку  $H$  на линии, составляющей некоторый угол  $\theta$  с оптической осью  $OO^1$  ( $\theta$  – угол между направлениями оптической оси и нормали  $n$  к плоскости  $xy$  фотопластинки  $H$ ). В этом случае распределение интенсивности света в плоскости фотопластинки определяется соотношением:

$$I(x, y) = |A \exp(i(\psi + \gamma)) + a_0 \exp(-i(\phi_0 + \gamma)) + a_1 \exp(-i(\phi_1 + \gamma))|^2 = A^2 + a_0^2 + a_1^2 + 2a_0a_1 \cos(\phi_1 + \phi_0) + 2Aa_1 \cos(2\gamma + \psi + \phi_1) + 2Aa_0 \cos(2\gamma + \psi + \phi_0). \quad (2)$$

Здесь  $\gamma = 2\pi\alpha x$  – задает величину пространственной частоты ( $\alpha = \frac{\sin \theta}{\lambda}$ );  $\lambda$  – длина исходной волны;  $A^2$  – засвеченный фон;  $a_0^2$  – фон когерентной составляющей;  $a_1^2$  – расфокусированное негативное изображение объекта (рисунок 2).

Данная голограмма состоит из трех информативных слагаемых, которые описывают:

1.  $2Aa_1 \cos(2\gamma + \psi + \varphi_1)$  – голограмму Денисюка, которая записывается по всей структуре фотослоя и потому является объемной.
2.  $2a_0a_1 \cos(\varphi_1 + \varphi_0)$  – осевую голограмму габоровского типа, которая записывается на поверхности фотослоя (со стороны объекта) и также по структуре фотослоя вдоль на-

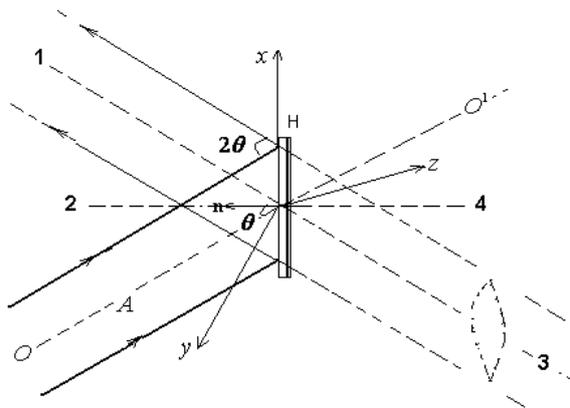


Рисунок 2 – Восстановление голограммы  $H$

правления распространения опорной волны  $a_0$ , соосной объектной волне.

3.  $2Aa_0 \cos(2\gamma + \psi + \varphi_0)$  – объемную регулярную голографическую решетку. Данная голографическая решетка способна как отражать, так и пропускать падающий свет. Условия, необходимые для формирования голограмм, обладающих высокой дифракционной эффективностью, задаются соотношениями:

$$A \geq \frac{a_0^2}{2}, \quad a_0 \geq \frac{a_1^2}{2}.$$

Данная голограмма имеет ряд важных свойств.

1. Восстановление голограммы белым светом, направление распространения которого совпадает с направлением распространения первоначальной опорной волны  $A$ , приводит к тому, что отраженный свет формирует мнимое изображение объекта  $O^1$  (рисунок 3) вдоль прямой, составляющей угол  $2\theta$  с осью голограммы (наблюдатель 1). Если угол наблюдения уменьшить, то можно заметить, что мнимое изображение начинает пропускать свет, а при наблюдении под углом  $+\theta$  можно наблюдать действительное изображение (наблюдатель 2). Изображение пропускает свет и, при этом имеет радужную окраску (рисунок 4). В направлениях между углами  $-\theta$  и  $+\theta$  наблюдатель может увидеть одновременно переднее изображение и края двух других изображений. Все указанные изображения расположены на одной прямой.

Увидеть эти изображения можно сместив линию наблюдения в сторону от оси, подобно тому, как это происходит в методе Габора. Однако в габоровском методе можно видеть либо действительное, либо мнимое изображения. В нашем случае видны одновременно три изображения. Ближнее или дальнее изображения являются мнимым или действительным. Это зависит от положения наблюдателя. Среднее изображение можно назвать сфокусированным. Сфокусированные снимки всех трех



Рисунок 3 – Мнимое изображение объекта в отраженном свете (наблюдатель 1)



Рисунок 4 – Действительное изображение объекта в отраженном свете (наблюдатель 2)



Рисунок 5 – Действительное изображение объекта в проходящем свете (наблюдатель 3)



Рисунок 6 – Мнимое изображение объекта в проходящем свете (наблюдатель 4)

изображений одновременно сделать не получилось, так как фокусировка возможна только на одном изображении. Остальные изображения видны только в расфокусированном виде.

При наблюдении в световом луче, не изменившем направления и прошедшем сквозь голограмму, т. е. в нулевом порядке дифракции, видимое изображение, в зависимости от точки наблюдения, является либо мнимым (рисунок 5), либо действительным (рисунок 6).

Эти изображения полупрозрачны и имеют радужную окраску. Между указанными точками наблюдения помимо основного изображения можно видеть края двух других восстановленных изображений [8, 9].

2. Восстановление голограммы белым светом, сфокусированным в нерасходящийся пучок, направление распространения которого совпадает с направлением первоначальной сопряженной вол-

ны, приводит к тому, что мы видим в свете, который отражается вдоль направления, составляющем угол  $2\theta$  с оптической осью, действительное изображение объекта. Изменение направления наблюдения приводит к тому, что помимо действительного изображения, можно увидеть краевые части сфокусированного и мнимого изображений. Кроме того, можно заметить, что в этом случае действительное изображение постепенно начинает пропускать свет, так как за ним можно увидеть мнимое изображение. Причем мнимое изображение скрывает еще одно изображение, край которого также можно наблюдать. Разворот голограммы на угол  $+\theta$ , становится причиной превращения действительного изображения в мнимое, которое имеет радужную окраску. Наблюдение голограммы в проходящем свете, также позволяет увидеть действительное и мнимое изображения объекта. Вид изображения зависит от положения наблюдателя. Объяснение тому факту, что действительное изображение объекта превращается в мнимое, и, наоборот, при развороте голограммы на угол  $\theta$ , позволяет предположить, что в этом случае мы заменяем исходную волну волной, сопряженной ей. Следствием чего является также смена второй опорной волны на волну, сопряженную ей.

**Выводы.** Введение в схему записи голограмм на встречных пучках позволяет получить голограмму, обладающую свойствами тонкослойных внеосевых голограмм, голограмм Бентона, Габора и Денисюка. При восстановлении такой голограммы белым светом возникают изображения мнимое и действительное в  $\pm 1$ -х порядках дифракции, что характерно для обычных, внеосевых голограмм. Кроме того в 0-м порядке можно наблюдать одновременно три изображения – действительное и мнимое, как в осевой голографии Габора,

и действительное или мнимое изображения  $\pm 1$ -х порядков дифракции. То есть меняя угол наблюдения, можно видеть одно и то же изображение записанного объекта. Данный эффект может быть использован в голографическом кино.

*Литература*

1. Денисюк Ю.Н. Голограмма с записью в трехмерной среде как наиболее совершенная форма изображения / Ю.Н. Денисюк, В.И. Суханов // Успехи физических наук. 1970. № 6. С. 176–181.
2. Maripov A. The Talbot effect (a self-imaging phenomenon) in holography. Interferometer based on the Talbot effect in holography / A. Maripov, Y. Ismanov // J. Optics (Paris). 1995. V. 26. N. 1. P. 25–28.
3. Исманов Ю.Х. Саморепродуцирование регулярных объектов с ограниченной апертурой / Ю.Х. Исманов, С.А. Алымкулов // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2015. №7. С. 3–5.
4. Исманов Ю.Х. Интерферометрия на основе метода бесщелевой радужной голографии / Ю.Х. Исманов // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова. 2015. № 4(50). С. 194–199.
5. Исманов Ю.Х. Эффект саморепродуцирования в голографии / Ю.Х. Исманов, Д.А. Исмаилов, К.М. Жумалиев, С.А. Алымкулов // Матер. VI межд. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. научн. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. С. 646–647.
6. Исманов Ю.Х. Голографический эффект Тальбота в интерферометрии / Ю.Х. Исманов // Вестник КРСУ. 2015. Т. 15. № 5. С. 101–103.
7. Исманов Ю.Х. Влияние длины волны на восстановленное изображение / Ю.Х. Исманов // Вестник КРСУ. 2015. Т. 15. № 5. С. 104–106.
8. Жумалиев К.М. Анализ голографических интерферограмм / К.М. Жумалиев, С.А. Алымкулов, Ю.Х. Исманов, Д.А. Исмаилов // Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2016. № 3(39). Ч. I. С. 56–60.
9. Кулмурзаев Н.М. Регистрирующие среды для голографии и радужная голография / Н.М. Кулмурзаев, Ю.Х. Исманов, Н.А. Тургунбаев // Вестник КГУСТА. 2014. № 1. С. 83–88.