

# НОВЫЕ АСПЕКТЫ В РАДУЖНОЙ ГОЛОГРАФИИ

*А. Марипов*

## Введение

Радужная голография (РГ) была предложена Бентоном [1] как двухступенчатый процесс голографической записи изображения предмета. Этот метод является трудоемким, так как он требует последовательной записи двух голограмм. Позднее были предложены более простые, одноступенчатые процессы записи радужных голограмм [2,3]. Неотъемлемой частью оптических схем всех этих методов записи является наличие в них узкой длинной щели, ограничивающей апертуру предметного луча. При этом на фотопластинку одновременно записываются голограммы щели и объекта. Во время освещения такой голограммы восстанавливаются одновременно изображения объекта и узкой щели. Последняя играет роль входного зрачка оптической системы, а также расщепляет на все цвета радуги падающий на нее белый свет.<sup>1</sup> Благодаря этому изображение объекта наблюдается в цветах радуги. Поэтому основная задача РГ сводится к формированию изображения апертурной щели между голограммным изображением объекта и наблюдателем. Общим недостатком вышеперечисленных схем [1-3] записи РГ является ограничение узкой щелью апертуры предметной волны, вследствие чего требуется длительная экспозиция при записи таких голограмм.

В ряде работ [4-6] показаны возможности получения РГ без использования реальной щели, путем создания щелевидной функции (синтезированной щели). Щелевидная функция создается в процессе записи голограммы дискретным или непрерывным перемещением или предметной волны, или самого предмета, или диффузора, или изображающей линзы по определенному закону. При этом используется полная апертура предметной волны. Схемы с синтезированной щелью, рассмотренные в [4,5], годятся только для пропускающих (типа транспарантов и фазовых) объектов и сложны для практической реализации из-за высокого требования, предъявляемого к кинематике движения для формирования синтезированной щели. Для записи РГ трехмерных диффузных объектов требовались еще более сложные кинематические устройства [6,7]. Имеются работы где схемы записи РГ пригодны только для записи ретрорефлексных [8] или пропускающих объектов [9], в последней при наличии щели вместо линзы использовано сферическое зеркало.

Таким образом, в схемах записи РГ обязательным элементом является наличие щели реальной или синтезированной, а также линзы.

<sup>1</sup> Автор не разделяет утверждение авторов [2,3] о том, что восстановленное изображение щели расщепляет белый свет на цвета радуги.

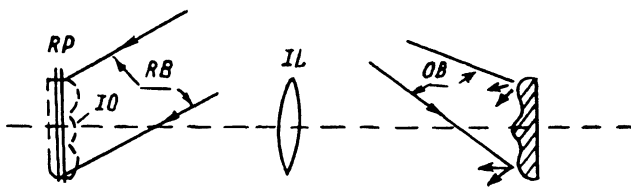


Рис. 1. Схема записи РГ отражающего объекта.

$RO$  — отражающий объект,  $IO$  — изображение объекта;  $IL$  — изображающая линза,  $RB$  — опорный луч,  $OB$  — освещающий луч,  $RP$  — регистрирующая пластинка.

### Условия безщелевой записи радужной голограммы пропускающих и отражающих объектов

Ниже покажем, что такие сложные схемы записи РГ с щелью, рассмотренные выше, оправданы только для чисто диффузных трехмерных объектов. В [10] показано, что при записи голограммы пропускающего объекта на фотопластинку одновременно записываются голограмма объекта и регулярная голографическая решетка (РГР). РГР монохроматизирует белый свет, поэтому при освещении такой голограммы белым светом изображение объекта восстанавливается во всех цветах радуги.

Принцип одновременной голограммы объекта и РГР можно распространить для безщелевой записи РГ отражающих объектов. Для этой цели можно использовать внеосевую схему записи голограммы Лейта без всякой щели.

Рассмотрим запись голограммы отражающего предмета  $RO$ , используя внеосевую схему (рис. 1). Коэффициент отражения такого объекта обозначим через

$$t(x, y, z) = t_0 + \Delta t, \quad (1)$$

где  $t_0$  и  $\Delta t$  соответственно характеризуют зеркальную и диффузную составляющие коэффициента отражения объекта.

В соответствии с (1) предметную волну после отражения от такого объекта можно представить как сумму волн

$$\mathbf{a} = a_0 \exp(-i\varphi_0) + a_1 \exp(-i\varphi_1), \quad (2)$$

где  $a_0$  и  $a_1$  — соответственно амплитуды зеркальной и рассеянной волн, определяемые составляющими коэффициента отражения  $t_0$  и  $\Delta t$ ;  $\varphi_0$  и  $\varphi_1$  — фазы этих волн.

При записи голограммы такого объекта плоской опорной волной  $\mathbf{A} = A \exp(-i\psi)$ , падающей под углом  $\theta$  к оси голограммы, интенсивность света на фотопластинке будет

$$J(x, y) = |A \exp(-i\gamma) + \mathbf{a}|^2 = A^2 + a_0^2 + a_1^2 + 2a_0a_1 \cos(\varphi_0 - \varphi_1) + 2Aa_1 \cos(\gamma + \psi - \varphi_1) + 2Aa_0 \cos(\gamma + \psi - \varphi_0). \quad (3)$$

В этом выражении имеются три интерференционных члена: первый  $2a_0a_1 \cos(\varphi_0 - \varphi_1)$  описывает голограмму Габора, второй  $2Aa_1 \cos(\gamma + \psi - \varphi_1)$  соответствует голограмме Френеля, третий  $2Aa_0 \cos(\gamma + \psi - \varphi_0)$  представляет собой голографическую решетку (где  $\gamma = 2\pi\alpha x$ ,  $\alpha = \sin \theta / \lambda$ ), пространственная частота которой зависит от угла  $\theta$ , формы волновых фронтов  $\mathbf{A}$  и  $a_0$ , расстояния между плоскостью голограммы и изображающей

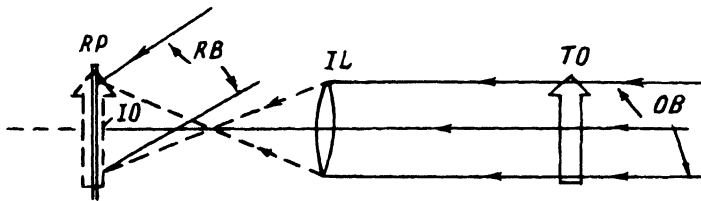


Рис. 2. Схема записи РГ пропускающих объектов.

$TO$  — пропускающий объект;  $IO$  — изображение объекта; остальные обозначения такие же, как и на рис. 1.

линзы  $IL$ , а также от ее фокусного расстояния. Для того чтобы эта решетка была регулярной, необходимо предварительно отфильтровать от всех пространственных частот, кроме нулевой, как опорный пучок, так и пучок, освещающий предмет. Такую фильтрацию в схеме осуществляют пространственные фильтры  $SF$ .

Из требования к достаточной дифракционной эффективности полученных голограмм (Габора и Френеля) и голографической решетки следует выполнение условий  $A \gtrsim a_0 \geq a_1$ . Выполнение этого условия возможно при соотношении составляющих коэффициента отражения

$$|t_0| \geq |\Delta t|, \quad (4)$$

т.е. зеркальная составляющая  $t_0$  сравнима или больше диффузной  $\Delta t$  составляющей коэффициента отражения объекта.

Таким образом, для получения регулярной голографической решетки с достаточной дифракционной эффективностью необходимо выполнение двух условий: 1) выполнение соотношения (4); 2) предварительное фильтрование как опорного, так и освещающего пучков от пространственных частот, кроме нулевой. При невыполнении первого условия получим РГ со слабой дифракционной эффективностью, а при невыполнении второго получится голограмма сфокусированного изображения. При освещении голограммы, записанной при выполнении обоих условий, белым светом благодаря наличию в ней регулярной голографической решетки восстанавливается изображение объекта во всех цветах радуги.

Сравнивая запись РГ отражающих объектов с записью РГ пропускающих объектов [10], видим, что в обоих случаях на фотопластинку одновременно записываются голограмма объекта и голографическая решетка. Голографическая решетка образуется за счет интерференции опорного пучка  $A$  с зеркальным компонентом  $a_0$  отраженного луча от отражающего объекта (рис. 1) или компонентом прошедшего без отклонения (с нулевым порядком дифракции) предметного пучка через пропускающий объект (рис. 2). Поэтому выражения для интенсивностей света на голограмме для этих объектов также имеют одинаковый вид (3). Следовательно, голограммы отражающих и пропускающих объектов обладают одинаковыми свойствами: в частности, при освещении белым светом восстанавливаются их изображения в цветах радуги. Другие свойства голограмм пропускающих объектов более подробно описаны в [10].

Анализируя рассмотренные выше схемы записи РГ отражающих и пропускающих объектов без щели и классические схемы записи РГ с щелью [1-9], можно сделать однозначный вывод в том, что узкая щель необходима только при записи РГ чисто диффузных объектов. А при

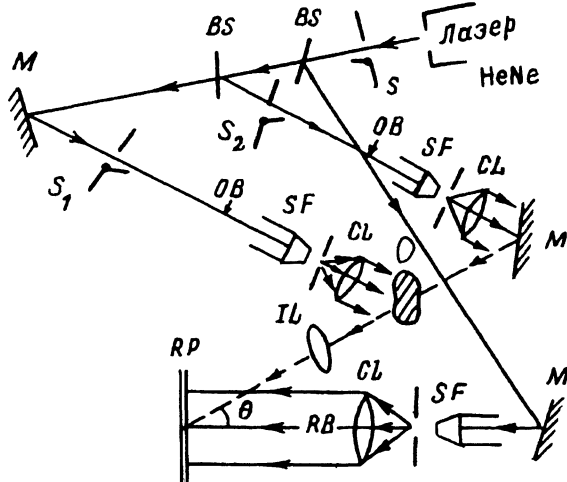


Рис. 3. Совмещенная реальная оптическая схема записи РГ отражающих  $RO$  и пропускающих  $TO$  объектов.

$S, S_1, S_2$  — оптические затворы;  $BS$  — делители пучков,  $M$  — зеркала,  $SF$  — пространственные фильтры,  $O$  — объект,  $RB$  — опорный луч;  $OB$  — освещающий луч;  $RP$  — регистрирующая пластинка;  $IL$  — изображающая линза;  $CL$  — конденсорная линза.

записи РГ пропускающих и частично диффузных отражающих объектов нет необходимости применения щели в схеме записи. Этим снимается один из главных недостатков в схеме записи РГ — сильное ограничение узкой щелью апертуры объектной волны.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

В экспериментах были выбраны три типа объектов: отражающий (однорублевая юбилейная монета), прозрачный (фазовый — ветка цветка розы из хрусталя) и транспарант (мира). Поверхность монеты была частично отполирована. Радужные голограммы этих объектов были записаны по внеосевой схеме без применения узкой апертурной щели: отражающего объекта  $RO$  по схеме рис. 1, пропускающих объектов  $TO$  по схеме рис. 2. Если выполняется условие приближения „тени“,  $z \leq 0.2l_{\min}^2/\lambda$  ( $z$  — расстояние от объекта до плоскости голограммы,  $l_{\min}$  — минимальная неоднородность в плоскости объекта,  $\lambda$  — длина световой волны), то нет необходимости вводить в схему записи РГ изображающей линзы  $IL$ .

Совмещенная реальная оптическая схема записи РГ и отражающих и пропускающих объектов приведена на рис. 3. Пространственная фильтрация как опорного  $RB$ , так и освещающего  $OB$  пучков осуществляется с помощью пространственных фильтров  $SF$ .

Записи РГ отражающего  $RO$  и пропускающего  $TO$  объектов, которые устанавливались на месте объекта  $O$ , производились с помощью оптических затворов  $S_1$  и  $S_2$ . При записи РГ отражающего объекта затвор  $S_1$  открыт,  $S_2$  закрыт, а при записи РГ пропускающих объектов положения затворов  $S_1$  и  $S_2$  противоположны первому. Если для данного объекта выполнимо условие приближения „тени“, то из оптической схемы записи можно вывести изображающую линзу  $IL$ . В качестве изображающей



Рис. 4. Черно-белая фотография изображения монеты в цветах радуги, восстановленного в белом свете.

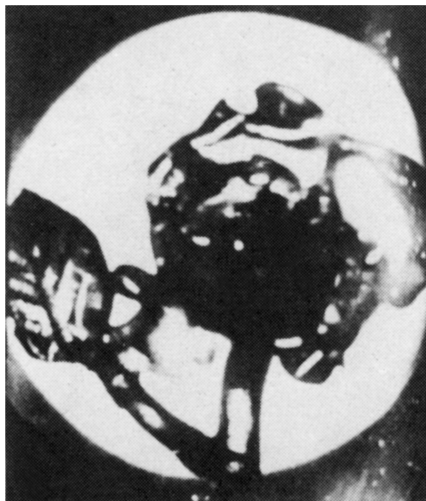


Рис. 5. Черно-белая фотография изображения ветки розы в цветах радуги, восстановленного в белом свете.

линзы  $IL$  применен объектив «Юпитер 36-В», фокусное расстояние которого равно 250 мм. Расстояние от объекта до объектива и от объектива до плоскости голограммы выбрано так, чтобы вблизи плоскости голограммы образовалось четкое изображение.

Голограммы записывались с помощью лазера ЛГ-38, в качестве регистрирующей среды использована фотопластинка ЛОИ-2, которая проявлялась в проявителе ГП-2. При освещении таких голограмм белым светом как в проходящем, так и в отраженном свете восстанавливаются изображения объектов в цветах радуги.

На рис. 4-6 соответственно приведены черно-белые фотографии, восстановленные в белом свете — радужные изображения монеты, ветки розы и мира. Увеличенная (в 3 раза) фотография восстановленного изображения мира (диаметр мира 2 см) (рис. 6) приведена для качественной проверки разрешающей способности выбранной оптической схемы РГ. Непроявление тонких линий в некоторых ячейках мира объясняется спектральной чувствительностью фотопленки (при пересъемке восстановленного изображения) на цвета радуги. В действительности в восстановленном радужном изображении мира с голограммы в белом свете во всех элементах линии контрастны и разрешены четко. Разрешающая способность оптической системы в основном зависит от разрешающей способности изображающей линзы  $IL$ .

### Выводы

Таким образом, экспериментально показаны и теоретически обоснованы условия одноступенчатой записи радужной голограммы отражающих и пропускающих объектов, применяя обычную внеосевую схему Лейта. При этом в схеме записи отсутствуют реальные или синтезированные щели. Этим снимается один из главных недостатков в схеме записи РГ —

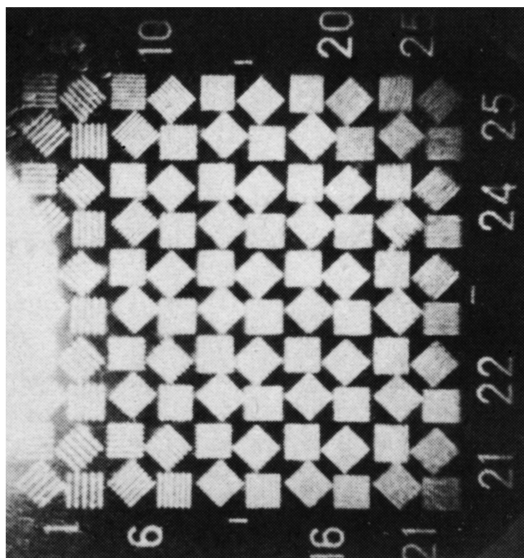


Рис. 6. Черно-белая фотография изображения мира в цветах радуги, восстановленного в белом свете.

сильное ограничение апертуры объектов волны узкой щелью. Восстановление изображения этих объектов в цветах радуги является следствием наличия зеркальной составляющей отраженной волны  $a_0$  или наличия нулевого порядка дифракции лучей, прошедших через объект. Если объект диффузный ( $a_0 \ll a_1$ ), то вклад первого и третьего интерференционных членов в (5) исключается и остаются члены обычного уравнения голографии Френеля, т.е. при освещении голограммы диффузного объекта белым светом его изображение не восстанавливается. Применение апертурной щели необходимо только для записи РГ чисто диффузных объектов.

#### Список литературы

- [1] Benton S.A. // J. Opt. Soc. Am. 1969. Vol. 59. P. 1545–1546.
- [2] Chen H., Yu F.T.S., Tai A.M. // Opt. Lett. 1978. Vol. 2. P. 85–87.
- [3] Podielska H., Kasprzak H. // Appl. Opt. 1983. Vol. 13. N 3. P. 307–311.
- [4] Crover C.P., Drill H.M. // J. Opt. Soc. Am. 1980. Vol. 70. N 3. P. 335–338.
- [5] Crover C.P., Lessard R.A., Tremelay P. // Can. J. Phys. 1984. Vol. 62. N 1. P. 77–83.
- [6] Shan Q., Chen Q., Chen H. // Appl. Opt. 1983. Vol. 22. N 23. P. 3902–3905.
- [7] Beanregard A., Lessard R.A. // Appl. Opt. 1984. Vol. 23. N 18. P. 3095–3098.
- [8] Bahuguna R.D. // Opt. Eng. 1988. Vol. 27. N 3. P. 243–245.
- [9] Torroba R., Ribai H.J., Garavaglia M.J. // Appl. Opt. 1986. Vol. 25. N 18. P. 3288–3290.
- [10] Марунов А. Радужная голография. Фрунзе: Илим, 1988. 146 с.

Бишкекский политехнический институт

Поступило в Редакцию  
11 января 1991 г.  
В оковчательной редакции  
24 марта 1992 г.