

06.3; 07

© 1992

ЗАПИСЬ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ  
ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ СЕЛЕКТОГРАММЫ

Ю.Н. Д е н и с ю к

Одним из основных приложений голограмм является запись и воспроизведение изображений, воспроизводящих иллюзию объемности регистрируемых объектов [1–3]. Развитие этого вида изобразительной техники показало, что наиболее удобными для практики являются такие разновидности голограмм, которые предъявляют минимальные требования к источнику света, осуществляющему их реконструкцию. В частности, в настоящее время наиболее широко используются радужные [3] и отражательные [1, 4] голограммы, которые допускают реконструкцию точечным источником обычного белого света. Естественно, возникает мысль, – нет ли возможности еще более упростить требования к восстанавливающему источнику света и создать такую структуру, которая была бы способна реконструировать трехмерные изображения при освещении ее протяженным некогерентным источником света подобно тому, как это имеет место при наблюдении обычной фотографии.

Вообще говоря, способностью выделять из протяженного фона излучение отдельных точек, а следовательно, и способностью формировать изображение, обладают трехмерные решетки глубокой голограммы. На самом деле, если ограничиться рассмотрением случая, когда лучи зарегистрированного на голограмме излучения лежат в одной плоскости и излучение характеризуется одной длиной волны, то нетрудно понять, что каждая трехмерная решетка в силу условий Брэгга выбирает из протяженного фона и направляет далее один определенный луч. При этом угол, в пределах которого решетка выбирает этот луч, может составлять порядка минут при толщине голограммы порядка миллиметров. Нетрудно понять, что такое высокое значение угловой селективности было бы вполне достаточно, чтобы сформировать изображение, предназначенное для визуального восприятия. К сожалению, однако, в общем случае, когда рассмотрение не ограничивается лучами, лежащими в одной плоскости и волны падают на решетку в некотором телесном угле, решетка взаимодействует со многими другими лучами, находящимися на поверхности некоторого конуса. Кроме этой принципиальной трудности следует упомянуть также и то, что любое практическое приложение глубоких голограмм связано с решением сложной технологической задачи создания светочувствительных сред.

Проблему формирования трехмерных изображений за счет использования селективных свойств глубокой голограммы существенно

облегчает однако то обстоятельство, что в силу особенностей строения визуального аппарата человека воспроизведение эффектов объемности объекта, и следовательно, и воспроизведение направлений распространяющихся от него лучей может быть ограничено одной горизонтальной плоскостью. Такой подход, в частности, был успешно использован С.А. Бентоном при создании известного метода радужных голограмм [3]. В данном случае такое ограничение задачи позволяет не только успешно использовать селективные свойства трехмерных решеток, но и обойтись без трехмерных структур вообще за счет применения предложенного нами ранее метода псевдоглубоких голограмм [5-8].

Рассмотрим возможность записи и воспроизведения трехмерных изображений за счет использования селективных свойств решеток, записанных на псевдоглубокой голограмме. Такую запись естественно назвать „селектограммой“. Введение этого нового термина оправдано в данном случае тем, что принцип формирования трехмерного изображения и свойства этого изображения (оно, в частности, не воспроизводит распределение фаз излучения) существенно отличаются от присущих голограмме.

Схема записи и реконструкции селектограммы приведена на рис. 1. На этапе записи (см. рис. 1) излучение монохроматического источника  $F$  (лучи  $\vec{U}_{F1}$ ,  $\vec{U}_{F2}$ ) освещает объект  $O$  и диффузор  $K$ , который расположен перед правой частью щели  $S$ , продланной в экране  $E$ . Излучение, рассеянное объектом, свободно проходит через левую, не закрытую часть щели  $S$ . Складываясь с излучением, прошедшим через диффузор, это излучение образует картину интерференции, которая записывается на фотопластинке  $H$ , наклоненной под малым углом  $\beta$  к оптической оси системы  $tz$ .

Реконструкция полученной таким способом селектограммы  $H$  осуществляется излучением, рассеянным диффузором  $K$  и прошедшим затем через щель  $S$  (см. рис. 1). Однако в этом случае, в отличие от голограммы, микроструктура используемого при реконструкции диффузора может существенно отличаться от микроструктуры диффузора, с помощью которого осуществлялась запись. Более того, реконструкция может осуществляться некогерентным протяженным самосветящимся источником света, значения фаз излучения которого в различных точках ( $r_1$ ,  $r_2$  ..., см. рис. 1) не коррелированы между собой.

Восстановленное селектограммой  $H$  излучение попадает в схему наблюдения (см. рис. 2), состоящую из линзы  $L$  и щели  $S'$ . Размеры щели  $S'$  совпадают с размерами изображения щели  $S$ , построенными с помощью линзы  $L$ . Наблюдатель  $V$ , воспринимающий восстановленное изображение объекта, находится за щелью  $S'$ .

В самых общих чертах механизм записи и формирования изображения с помощью селектограммы сводится к следующему.

Излучение точек объекта, интерферируя с излучением точек референтного источника, записывает на фотопластинке  $H$  систему решеток. В частности, в результате интерференции излучения точек

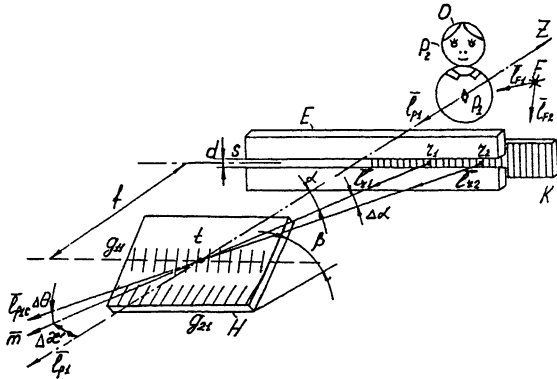


Рис. 1. Схема регистрации и реконструкции селектограммы.

О - объект, F - источник монохроматического излучения, E - экран, в котором проделана щель S, H - голограмма, наклоненная под малым углом  $\beta$  к оптической оси системы  $tz$ .

объекта  $P_1, P_2$  и референтной точки  $r_1$  на фотопластинке H образуются решетки  $g_{11}, g_{21}$ . Аналогично с участием точки регистрируются решетки  $g_{12}, g_{22}$  (на рисунке не обозначены).

При реконструкции излучение точек референтного источника, взаимодействуя с гармониками, в образовании которых эти точки участвовали, в соответствии с общими принципами голографии восстановит лучи, которые распространяются от точек объекта через щель S, а следовательно, и через S'. Например, излучение точки референтного источника  $r_1$ , взаимодействуя с решетками  $g_{11}$  и  $g_{21}$ , восстановит лучи точек объекта  $P_1$  и  $P_2$ , которые за линзой L формируют изображения этих точек  $P'_1$  и  $P'_2$  и далее проходят через щель S', например, в точке  $r_1$  (см. рис.2).

Однако, когда излучение точек референтного источника взаимодействует с решетками, в образовании которых эти точки не участвовали, восстановленные лучи в соответствии с принципом действия псевдоглубокой голограммы не попадут в щель S' и будут отсечены экраном E' [4-6]. Например, излучение точки  $r_2$ , взаимодействуя с гармониками  $g_{11}, g_{21}$ , в образовании которых эта точка не участвовала, восстановит лучи, которые пройдут мимо щели S' в каких-то точках  $r_2$  и  $r_3$  и будут отсечены экраном E'.

В результате рассмотренного процесса каждая точка референтного источника, взаимодействуя со „своей“ частью структуры селектограммы, восстановит „свое собственное“ изображение объекта O. Поскольку фазы различных точек реконструирующего источника не коррелированы с фазами референтного источника, а в общем случае также и между собою, то изображения объекта, восстановленные всеми этими точками, будут складываться в суммарное

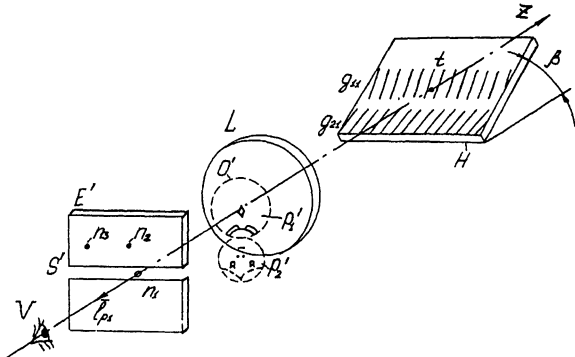


Рис. 2. Схема наблюдения изображения, восстановленного селектограммой.

$E'$  — экран, содержащий щель  $S'$ ,  $L$  — линза, проецирующая щель  $S'$  на щель  $S''$ ,  $O'$  — восстановленное селектограммой изображение, которое воспринимает наблюдатель  $H$ .

изображение  $O'$  по интенсивности, а не по амплитуде (см. рис. 2).

Рассмотрим в самых общих чертах разрешающую способность селектограммы на примере изображения точки объекта  $P_1$ , расположенной на оптической оси системы  $tz$  (см. рис. 1). В вертикальной плоскости селектограмма действует как обычная голограмма и, следовательно, угловая разрешающая способность в этой плоскости  $\Delta\gamma_0$  ограничивается углом дифракции на этой щели, который определяется длиной волны излучения  $\lambda$  и шириной щели  $d$

$$\Delta\gamma_0 = \frac{\lambda}{d}. \quad (1)$$

Разрешающую способность селектограммы в горизонтальной плоскости найдем, рассмотрев процесс взаимодействия восстанавливающего излучения с решеткой  $g_H$ , полученной в результате записи картины интерференции, распространяющегося под углом  $\alpha$  друг к другу излучения точки объекта  $P_1$  (луч  $\vec{l}_{P1}$ ) и точки объекта  $P_2$  (луч  $\vec{l}_{P2}$ ) (см. рис. 1). Однако решетка  $g_H$  будет взаимодействовать также с излучением „чужих“ точек референтного источника, например, с лучом  $\vec{l}_{P2}$ , испущенным точкой  $P_2$  и распространяющимся под углом  $\Delta\alpha$  к лучу  $\vec{l}_{P1}$ . В работе [6] было показано, что восстановленный луч в этом случае отклонится на угол  $\Delta\theta$  по вертикали, т.е. из положения  $\vec{l}_{P1}$  в промежуточное положение  $\vec{m}$  и затем из  $\vec{m}$  в окончательное положение  $\vec{l}_{P1C}$ . В соответствии с выражениями (29) и (32) работы [6]

в случае, когда угол  $\alpha$  достаточно мал, углы  $\Delta x$  и  $\Delta \theta$  определяются следующими соотношениями:

$$\Delta x \approx \Delta \alpha, \quad (2)$$

$$\Delta \theta \approx \frac{\alpha}{\beta} \cdot \Delta \alpha. \quad (3)$$

Очевидно, что щель  $S'$  пропустит только такие лучи, угол отклонения которых в вертикальной плоскости не превышает углового размера этой щели. Приводя все соотношения к пространству предметов и щели  $S$ , получим:

$$\Delta \theta_0 = \frac{d}{f}. \quad (4)$$

Подставив  $\Delta \theta_0$  из (4) в (3), найдем угловой размер участка референтного источника  $\Delta \alpha_0$ , излучение точек которого, дифрагируя на решетке  $g_H$ , проходит через щель  $S'$ . В соответствии с (2) полученное таким образом соотношение определит также размытие по горизонтали каждой точки восстановленного селектограммой изображения, т.е. угловую разрешающую способность селектограммы по горизонтали  $\Delta x_0$ :

$$\Delta x_0 \approx \frac{\beta}{\alpha} \frac{d}{f}. \quad (5)$$

Потребуем, чтобы разрешающие способности селектограммы по горизонтали и по вертикали были одинаковы, и найдем ширину щели  $d$ , при которой это условие выполняется. Приравнявая  $\Delta x_0$  (5) к  $\Delta y_0$  (1), получим:

$$d = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta} \lambda \cdot f}. \quad (6)$$

Следует отметить, что более детальное рассмотрение дает несколько уточненное выражение для ширины щели  $d$ , однако (6) может использоваться для приблизительных оценок. В частности, например, в случае, когда  $f = 100$  мм,  $\lambda = 0.5$  мкм, а  $\alpha$  и  $\beta$  соответствуют углам порядка единиц градусов, размер щели, при котором разрешение в вертикальном и горизонтальном направлении одинаковы, составляет приблизительно 0.2 мм. Угловая разрешающая способность селектограммы  $\Delta y_0 = \Delta x_0$  составляет при этом порядка 0.002 рад, что вполне достаточно для многих видов практических приложений.

Предложенный метод может найти приложение при создании объемного телевидения, объемных дисплеев компьютеров, а также при регистрации трехмерных объектов в тех случаях, когда референтный источник формируется из излучения объекта.

Пользуюсь приятной возможностью выразить свою благодарность Н.М. Ганжерли за проведение предварительных экспериментов, подтвердивших дееспособность данного метода.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Денисюк Ю.Н. // ДАН СССР. 1962. Т. 144. № 6. С. 1275-1278.
- [2] Leith E.N. and Upatnieks J. // Journ. Opt. Soc. Amer. 1964. V. 54. N 11. P. 1295-1299.
- [3] Venton S.A. // Journ. Opt. Soc. Amer. 1969. V. 59-10. P. 1545A.
- [4] Денисюк Ю.Н. // Оптика и спектр. 1963. Т. 15. № 4. С. 522-532.
- [5] Денисюк Ю.Н. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 8. С. 84-89.
- [6] Денисюк Ю.Н. // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 6. С. 59-66.
- [7] Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М. // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 11. С. 154-164.
- [8] Denisjuk Y.N., Ganzherli N.M. // SPIE Proceedings UNESCO Seminar Kiev (1989). Т. 1238. P. 2-10.

Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе,  
С.-Петербург

Поступило в Редакцию  
3 января 1992 г.