04

Эксперименты по получению трехмерных изображений объектов с помощью селектограмм и безопорных селектограмм (обзор)

© Н.М. Ганжерли

ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия

e-mail: nina.holo@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 04.02.2026 г.
В окончательной редакции 27.04.2026 г.
Принята к публикации 27.04.2026 г.

Обобщены результаты использований селектограмм и безопорных селектограмм для получения трехмерных изображений объектов. Приведены различные оптические схемы регистрации трехмерных объектов и результаты экспериментов по получению голографических изображений. Проведена оценка разрешающей способности метода безопорных селектограмм. Показано существенное влияние на разрешающую способность метода толщины светочувствительной среды, использованной для регистрации, а также ширины фильтрующей щели.

Ключевые слова: селектограмма, безопорная селектограмма, псевдоглубокая голограмма, толстослойная светочувствительная среда, дифракционная решетка, голографическое изображение.

DOI: 10.61011/OS.2026.09.63814.9064-26

Введение

Запись и получение голографических изображений, воспроизводящих иллюзию трехмерности регистрируемых объектов, является одним из основных приложений голографии [1–3]. Известные методы получения трехмерных изображений с помощью отражательных [1,2] и радужных [3] голограмм требуют для их получения пучок белого света, например, от лампы накаливания или от солнца.

Изобразительные голограммы, получаемые по методу Ю.Н. Денисюка [1], наглядно демонстрируют основные свойства голограмм. Главным из них является возможность получения объектной волны, неотличимой зрительным аппаратом человека от волны, сформированной объектом при освещении его на этапе записи голограммы. В результате наблюдатель получает объективную информацию о пространственной форме и структуре поверхности объекта.

Любые упрощения условий записи голограммы и получения голографических изображений должны благоприятно влиять на ее практические приложения. Развитие изобразительной голографии показало, что наиболее удобными для практики являются те разновидности голограмм, которые, в отличие от голограмм Э. Лейта и Ю. Упатниекса [2], требующих для восстановления объектной волны когерентное излучение, предъявляют минимальные требования к восстанавливающему источнику света. Возникает естественный вопрос: можно ли снизить требования, предъявляемые к источнику света, т. е. разработать такие типы голограмм, которые подобно обычным фотографиям допускали бы запись и восстановление объектной волны с помощью протяженных источников света?

Способностью выделять из протяженного фона излучение отдельных точек, а следовательно, и формировать голографическое изображение обладают трехмерные голограммы. Ограничимся рассмотрением случая, когда лучи зарегистрированного на голограмме излучения лежат в одной плоскости, а излучение характеризуется одной длиной волны. В этом случае каждая голограмма-решетка в силу условий Брэгга выбирает из протяженного фона и направляет далее один определенный луч. Угол, в пределах которого решетка выбирает этот луч, может составлять минуты при толщине голограммы порядка миллиметров.

Такой высокой угловой селективности было бы вполне достаточным, чтобы сформировать голографическое изображение, предназначенное для визуального восприятия. Однако в общем случае, когда волны падают на решетку в некотором телесном угле, а не только распространяются в одной плоскости, решетка взаимодействует со многими другими лучами, находящимися на поверхности некоторого конуса. Следует учитывать и то, что любое практическое приложение трехмерных голограмм связано с решением сложной технологической задачи поиска и создания толстослойных светочувствительных сред.

Формирование трехмерных голографических изображений за счет использования селективных свойств трехмерной голограммы существенно облегчает то обстоятельство, что в силу особенностей строения визуального аппарата человека воспроизведение эффектов трехмерности объекта может быть ограничено одной горизонтальной плоскостью. Основанный на этом подход

был, в частности, успешно использован проф. С.А. Бентоном при создании известного метода радужных голограмм [3]. Такое ограничение задачи позволяет не только использовать селективные свойства трехмерных голограмм, но и вообще обойтись без трехмерных структур за счет применения предложенного Ю.Н. Денисюком в начале 90-х годов прошлого века метода псевдоглубоких голограмм [4–9]. Этот метод был разработан применительно к задаче регистрации информации в тонкослойных светочувствительных материалах с целью возможного упрощения требований, предъявляемых к источникам восстанавливающего объектную волну излучения.

Псевдоглубокая голограмма имеет свойства трехмерной голограммы за счет использования специальной оптической схемы с фильтрующей горизонтальной щелью при регистрации на наклонно расположенный тонкослойный светочувствительный материал без использования толстослойных сред [4–9]. Такая голограмма обладает угловой и спектральной селективностью, характерной для трехмерных голограмм. Использование в записи псевдоглубоких голограмм тонкослойных светочувствительных сред существенно упрощает требования к светочувствительному материалу и тем самым открывает возможность осуществления ряда новых практических приложений. Значительным преимуществом псевдоглубокой голограммы является также и то, что третье измерение пространства голограммы может использоваться для контроля ее структуры. Псевдоглубокая голограмма может быть синтезирована с помощью компьютера, что практически невозможно в случае действительно трехмерной голограммы. Платой за это является необходимость отказа от двумерных страниц информации и переход к страницам, имеющим вид строки. Однако линейные страницы информации могут применяться в оптических устройствах, предназначенных для обработки радиосигналов. Такие страницы информации, в частности, удобны еще и тем, что их можно вводить с помощью акустооптических линий задержки.

В 1992 году Ю.Н. Денисюк существенно модифицировал метод псевдоглубоких голограмм, предложив для получения трехмерных голографических изображений метод так называемых селектограмм. Это название естественно следует из использования селективных свойств голограмм, записанных на псевдоглубокой голограмме. Существо метода, его обоснование и экспериментальная проверка изложены в статьях [10–14].

Главной отличительной чертой селектограммы является способность образовывать трехмерные голографические изображения из сплошного диффузного фона посредством брэгговской селекции его компонент решетками псевдоглубокой голограммы. Метод селектограмм показал возможность упрощения требований, предъявляемых к восстанавливающему источнику света, которым может стать протяженный некогерентный источник белого света как при наблюдении обычной фотографии. В работе [10] Ю.Н. Денисюк также показал, что в отличие от голограммы микроструктура использованного при восстановлении объектной волны диффузора может существенно отличаться от микроструктуры диффузора, использованного при записи. Более того, восстановление объектной волны может осуществляться некогерентным протяженным источником света. В той же статье Ю.Н. Денисюком приведены расчеты разрешающей способности метода в горизонтальной и в вертикальной плоскостях, а также ширины фильтрующей щели, при которой разрешающая способность по этим двум направлениям одинакова.

Схема регистрации селектограмм и восстановления объектной волны с помощью селектограммы

В статьях [9–13] приведены оптические схемы регистрации и восстановления объектной волны с помощью селектограммы, базирующиеся на схемах записи и восстановления объектной волны псевдоглубокой голограммой. Представлены экспериментальные результаты получения голографических изображений с помощью селектограммы.

Рассмотрим подробно оптическую схему эксперимента [9], которая приведена на рис. 1, *a*. На этапе записи излучение монохроматического источника F (лучи l_{F1} и l_{F2}) освещает объект O и диффузор K. Рассеянное объектом O излучение свободно проходит через незакрытую диффузором K часть щели в экране E. Складываясь с излучением, прошедшим через диффузор K, рассеянное объектом излучение образует картину интерференции, которая записывается на тонкослойной фотопластинке H, наклонённой под малым углом β к оптической оси системы tz.

Восстановление объектной волны (рис. 1, *a*) осуществляется излучением, рассеянным диффузором и прошедшим через щель S. Как отмечалось ранее в статье [10], микроструктура используемого при восстановлении объектной волны диффузора может существенно отличаться от микроструктуры диффузора, с помощью которого осуществлялась запись.

Восстановленная селектограммой объектная волна попадает в схему наблюдения (рис. 1, *b*), которая состоит из линзы L и щели S'. Размеры щели S' совпадают с размерами изображения щели S, построенными с помощью линзы L. Наблюдатель V, воспринимающий голографическое изображение объекта, находится за щелью S'.

В самых общих чертах запись объектной волны и формирование голографического изображения с помощью селектограммы сводится к следующему. Излучение точек объекта, интерферируя с излучением точек источника опорной волны, записывает на фотопластинке систему спекл-голограмм. При восстановлении объектной волны излучение точек источника опорной волны взаимодействует с гармониками, в образовании которых

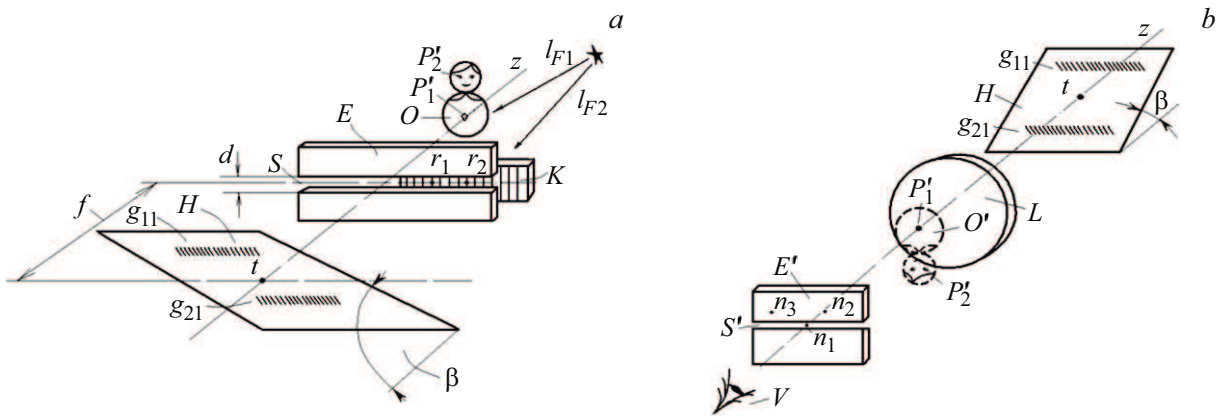


Рис. 1. Схема записи и восстановления объектной волны с помощью селектограммы (a) и схема наблюдения голографического изображения (b).

эти точки участвовали. Однако когда излучение точек источника опорной волны взаимодействует с решетками, в образовании которых излучение этих точки не участвовало, восстановленные лучи в соответствии с принципом действия псевдоглубокой голограммы не попадут в щель S' и будут отсечены экраном. В результате каждая точка источника опорной волны, взаимодействуя со „своей“ частью структуры селектограммы, позволит восстановить „свое“ изображение объекта. Поскольку фазы различных точек восстанавливающего источника не коррелированы с фазами источника опорной волны, а в общем случае также и между собой, то изображения объекта, полученные всеми этими точками, будут складываться в суммарное изображение O' по интенсивности, а не по амплитуде.

В эксперименте по записи селектограмм (рис. 1, a) расстояние f от голограммы H до щели S было 100 mm, угол между опорным и объектным пучками, как и угол β наклона голограммы H, был равен 10°. Для записи селектограмм использовалось излучение гелий-неонового лазера с длиной волны 0.63 μm. Ширина щели d была равна 0.25 mm.

Для записи селектограмм использовалось два вида объектов. В первом случае объект был сконструирован в форме двух специальных решеток, расположенных на разных расстояниях от селектограммы. На стадии записи объект освещался лазером и с помощью цилиндрической линзы фокусировался на горизонтальную щель S. На стадии восстановления, если селектограмма освещалась излучением от того же диффузора, расположенного в том же самом месте, как при записи, то создавалось четкое трехмерное изображение. Если же диффузор сдвигался, изображение не исчезало, а становилось более размытым.

Регистрация произвольного диффузного объекта более сложна. В этом случае из-за фильтрующей щели мало света попадало в область светочувствительного материала. Для увеличения интенсивности света было сделано

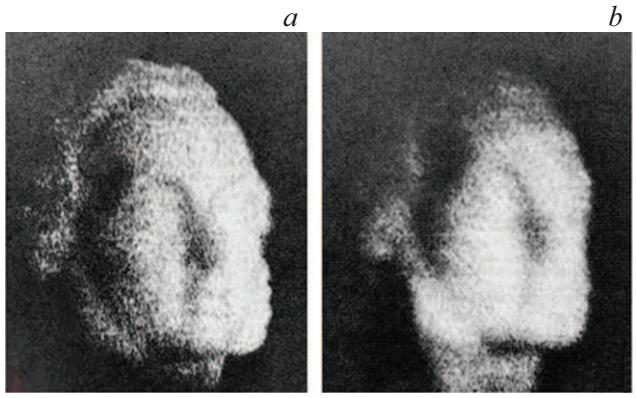


Рис. 2. Голографические изображения, полученные с помощью голограммы Денисюка (a) и селектограммы (b).

следующее. Излучение, отраженное от диффузного объекта, вначале регистрировалось на голограмму Денисюка, голографическое изображение которого приведено на рис. 2, a. Голограмма освещалась узкой полоской света, имеющей форму щели S. Далее восстановленная голограммой Денисюка объектная волна записывалась на селектограмме. Голографическое изображение, полученное с помощью селектограммы, приведено на рис. 2, b. Эксперимент показал, что голографическое изображение объекта практически не чувствительно к сдвигам щели S' в вертикальном направлении. Из сравнения изображения, восстановленного голограммой Денисюка (рис. 2, a), с изображением, полученным с помощью селектограммы (рис. 2, b), видно, что восстановленное голограммой Денисюка изображение заметно более четко, но в нём присутствует спекл-шум.

Эксперименты подтвердили, что селектограмма, в отличие от голограммы Денисюка, допускает запись и получение трёхмерных изображений с использованием протяженных опорного и восстанавливающего источников света. При восстановлении объектной волны

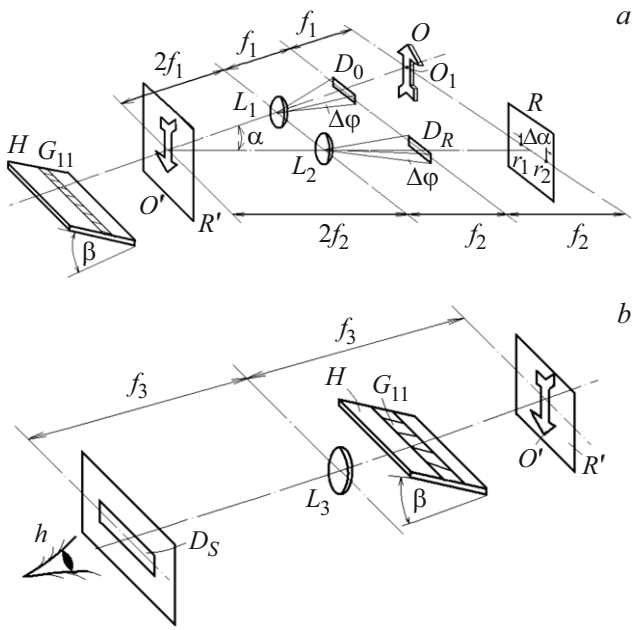


Рис. 3. Схема регистрации объектной волны (a) и наблюдения голографического изображения (b) с использованием селектограммы сфокусированного изображения.

в качестве опорного излучения может использоваться также излучение самого объекта. Поскольку в этом случае объектная и опорная волны взаимно когерентны, для освещения объекта могут использоваться лазеры с низкой степенью когерентности. При восстановлении объектной волны селектограмма освещается протяженными некогерентными источником света.

Обсуждая такие приложения, как трехмерные дисплеи компьютеров, трехмерное телевидение и кинематограф, следует отметить, что изображение, сформированное селектограммой, не содержит избыточной информации о значении фаз на поверхности объекта. Это свойство селектограммы открывает возможность сужения полосы частот сигналов, что упрощает передачу трехмерного изображения по каналам связи.

Подробное рассмотрение разрешающей способности сформированного селектограммой голографического изображения проведено в статьях [11–15]. Поскольку ширина фильтрующей щели сильно влияет на селективность системы, а следовательно, и разрешающую способность регистрируемого изображения, то эта щель должна быть достаточно узкой, что ограничивает светосилу системы.

Одним из возможных способов увеличения интенсивности излучения регистрируемого объекта является переход к регистрации изображений объектов, предварительно сфокусированных в область, где располагается фотопластинка, на которой записывается селектограмма [14–16].

Рассмотрим подробнее описанную в статье [15] оптическую схему, использованную в эксперименте для регистрации объектной волны с помощью селектограммы (рис. 3, a). Излучение объекта O и протяженного диффузного опорного источника R проходит через щели D_O и D_R соответственно. Линзы L_1 и L_2, расположенные на фокусных расстояниях f_1 и f_2 за соответствующими им щелями, фокусируют изображение объекта O' и опорного источника R' в область, находящуюся вблизи наклонной фотопластинки H. В результате интерференции излучения точек объекта и опорного источника на фотопластинке регистрируется множество решеток, одна из которых, полученная в результате интерференции излучения точек O_1 и r_1 объекта и опорного источника, обозначена G_{11}.

В эксперименте угол β наклона фотопластинки H, на которой регистрировалась селектограмма, составлял 10° (рис. 3, a). Среднее значение угла между объектом O и опорным источником R было равно 20°. Параметры схемы эксперимента соответствовали случаю, когда разрешающая способность в вертикальной и горизонтальной плоскостях равны друг другу. Объект O представлял собой транспарант размером 20×20 mm с изображением одной из графических работ художника М.С. Эшера (рис. 4, a).

Объект освещался через матовое стекло излучением гелий-неонового лазера ($\lambda = 0.63\,\mu$m). Фокусные расстояния линз L_1 и L_2, проецирующих объект и опорный источник либо на фотопластинку, либо вблизи нее, равны 200 mm. Регистрация селектограмм осуществлялась на высокоразрешающих фотопластинках для голографии ПФГ-03.

При формировании голографического изображения (рис. 3, b) селектограмма H освещалась излучением, прошедшим через матовое стекло, структура которого в общем случае не имела ничего общего со структурой использованного при записи опорного источника. В качестве источников излучения, создающего голографическое изображение, использовались гелий-неоновый лазер, а также лампа накаливания. Сформированная с помощью селектограммы объектная волна попадала на линзу L_3, расположенную на фокусном расстоянии f_3 от плоскости, в которой находились созданные линзами L_1 и L_2 голографические изображения объекта O' и опорного источника R'. За линзой L_3 в ее задней фокальной плоскости была установлена щель D_S, оптически сопряженная со щелью D_O, которая фильтровала объектную волну при записи. Полученное голографическое изображение проецировалось линзой L_3 на бесконечность, фильтровалось щелью D_S и регистрировалось через эту щель фотоаппаратом с длиннофокусным объективом. При записи объектной волны и получении голографических изображений с помощью селектограммы ширина щелей была одинаковой и менялась в ходе эксперимента от 0.3 до 16 mm.

В начале эксперимента объектная волна O' проецировалось непосредственно на фотопластинку. Точнее, плоскость, содержащая голографическое изображение O', пересекала наклонную фотопластинку в ее середине.

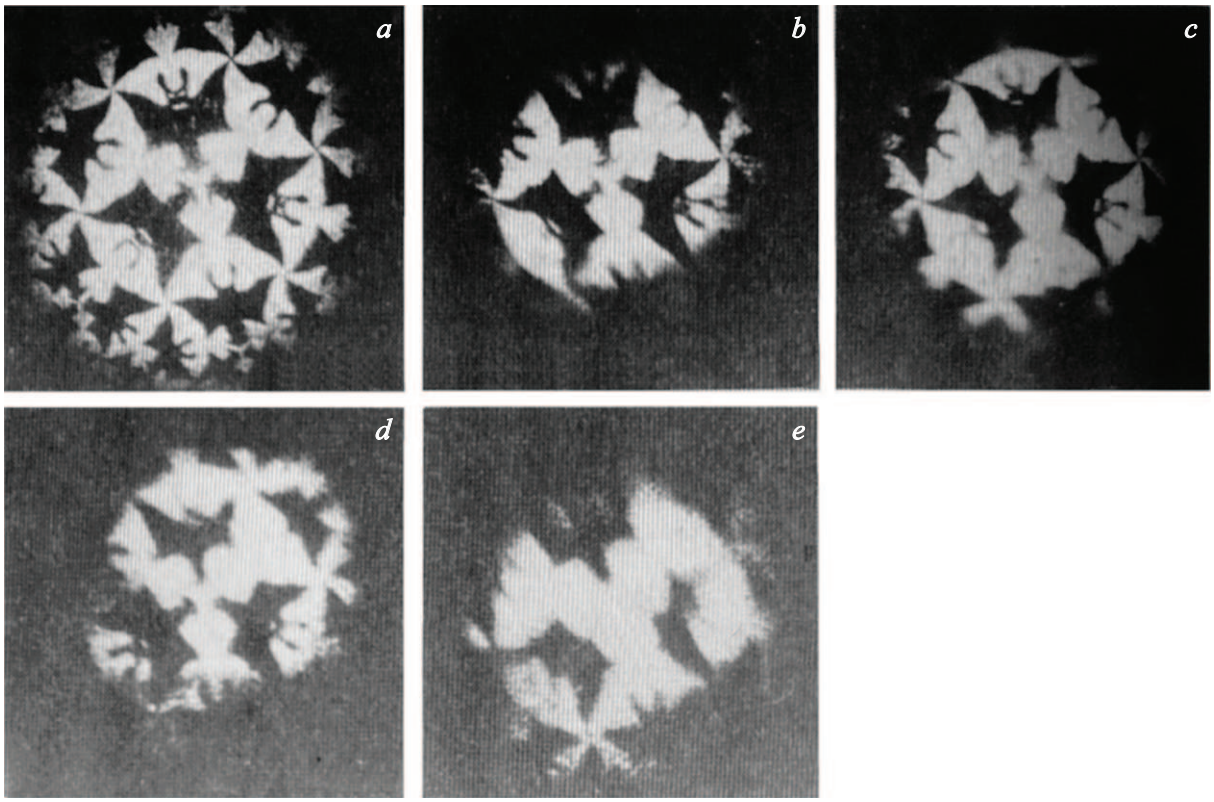


Рис. 4. Результаты эксперимента по регистрации изображений с помощью селектограммы сфокусированного изображения.

Эксперимент показал, что в этом случае фильтрующие щели D_O, D_R и D_S могут быть расширены до 5 mm без видимого ухудшения качества изображения (рис. 4, *b*). Светосила устройства при записи объектной волны и при получении голографических изображений в этом случае возрастает, что существенно улучшает условия эксперимента. При учете того, что фокусное расстояние линзы L_1 равно 200 mm, угловая разрешающая способность системы составила 0.025 rad. Так как расстояние от крайних деталей изображения до фотопластинки вдоль хода лучей не превышало 20 mm, то размытие крайних верхней и нижней частей изображения не превышало 0.5 mm.

Селектограмма с записью сфокусированного изображения объекта оказалось малочувствительной к спектральному составу восстанавливающего излучения. На рис. 4, *c* приведен пример голографического изображения, полученного излучением лампы накаливания. Ширина щелей при регистрации селектограммы и наблюдении голографического изображения была 5 mm. Качество изображения было достаточно хорошим, однако наблюдался небольшой ахроматизм. Необходимо отметить, что на линии пересечения изображения объекта и фотопластинки каких-либо дополнительных шумов и искажений не наблюдалось.

На рис. 4, *e* представлен результат влияния на качество голографического изображения дефокусировки при фокусировке изображения объекта на расстоянии 45 mm от центра селектограммы. Ширина щели была 2 mm. Угловая разрешающая способность должна составлять при этом порядка 0.01 rad, а размытие должно быть около 0.45 mm. Плоскость наилучшего качества голографического изображения находилась также на расстоянии 45 mm от центра фотопластинки как при записи.

Необходимость уменьшения ширины щели в случае, когда объектная волна при регистрации не была сфокусирована на фотопластинку, иллюстрирует рис. 4, *d*. Объектная волна фокусировалась на расстоянии 45 mm от центра фотопластинки, а ширина щелей составляла 12 mm. Угловое разрешение в данном случае было около 0.05 rad при размытии изображения порядка 2 mm. При сравнении фотографий рис. 4, *b*–*d* видно, что при возрастании расстояния от плоскости сфокусированной объектной волны до селектограммы требования к ширине фильтрующей щели существенно возрастают.

Требования к разрешающей способности могут быть в этом случае существенно уменьшены, а ширина щели соответственно увеличена. Этот случай имеет ряд преимуществ перед регистрацией объектной волны без щели. В частности, в результате снижения требований к разрешающей способности открывается возможность расширить щель, фильтрующую излучение объекта, и, следовательно, увеличить светосилу устройства при регистрации изображения. Предварительная фокусировка объектной волны на селектограмму позволяет также существенно уменьшить количество дополнительных го-

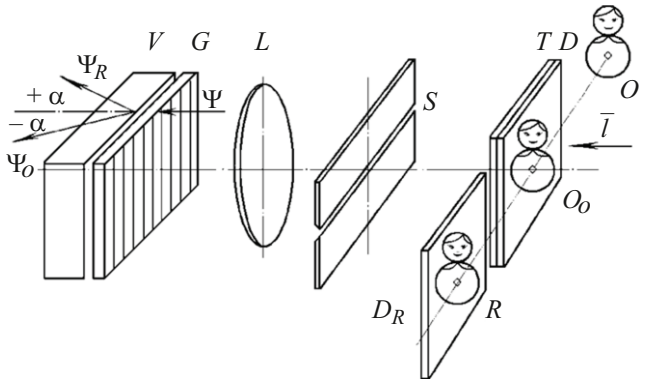


Рис. 5. Схема записи и восстановления объектной волны с помощью безопорной селектограммы.

лографических изображений и тем самым увеличить дифракционную эффективность основного голографического изображения. Упомянутые преимущества рассмотренного метода существенно способствуют его применению для регистрации объектной волны с использованием излучения самого объекта в качестве источника опорного излучения. Это, в свою очередь, открывает возможность существенного уменьшения степени когерентности излучения, освещающего объект при регистрации.

Использование опорной волны, сформированной из излучения, рассеянного регистрируемым объектом, обсуждалась еще в работах 60-х годов, например, в статье [17]. Такие голограммы получили название „голограмм с локальным опорным лучом“.

Схемы записи селектограмм и получения голографических изображений с помощью безопорной селектограммы

В случае селектограмм источник света при регистрации может быть сформирован из света, рассеянного тем же самым объектом, который регистрируется. Поиск и использование оптического элемента, который будет расщеплять излучение, рассеянное объектом, на объектную и опорную составляющие, стал следующим шагом в развитии метода селектограмм. В статьях [18,19] был предложен метод так называемых безопорных селектограмм, в котором опорная волна формируется из объектной с помощью дифракционной решетки [20,21], расположенной непосредственно перед толстослойным светочувствительным материалом (рис. 5). В этих статьях также проведен анализ процесса формирования голографического изображения в данном случае.

Объект-транспарант T освещался излучением, рассеянным диффузором D, на который падали лучи l от когерентного источника. Изображенный на транспаранте объект обозначен O_O. Рассеянное объектом излучение фильтровалось горизонтальной щелью S. Линза L формировала волну ψ так, что она распространялась в горизонтальной плоскости. Волна ψ далее направлялась на дифракционную решетку G, установленную непосредственно перед толстослойной светочувствительной средой V. Решетка G была выполнена таким образом, что падающая на нее волна ψ делилась на две идентичные компоненты, отклоненные в горизонтальной плоскости на углы $+\alpha$ и $-\alpha$, а нулевой порядок дифракции был подавлен. Одну из этих компонент ψ_O можно считать объектной, вторую ψ_R — опорной. Объектная волна ψ_O формировала мнимое изображение объекта O, опорная волна ψ_R мнимое изображение объекта R. Результат интерференции этих волн регистрировался в толстослойной светочувствительной среде V.

Образованное решеткой G мнимое изображение объекта R является своеобразным „окном“ (или „зрачком“), через которое должно проходить излучение, создающее голографическое изображение. При этом излучение каждой находящейся в пределах этого зрачка точки диффузного экрана восстановит только ту частичную голограмму, которая была записана излучением точки опорного источника R, находящейся в том же самом месте на этапе регистрации.

Существенно, что излучение каждой точки восстанавливающего источника создаст „свое“ изображение объекта и не будет взаимодействовать с частичными голограммами, записанными излучением других точек. Важно и то, что распределение амплитуд и фаз на поверхности восстанавливающего источника света не влияет на конфигурацию полученного голографического изображения объекта и поэтому может быть произвольным. Точки восстанавливающего источника, которые не совпадают с точками мнимого изображения объекта R, не примут участия в формировании голографического изображения объекта O ввиду отсутствия частичных голограмм, которые могли бы преобразовать их излучение.

К полезным свойствам рассматриваемой схемы безопорной селектограммы следует отнести ее низкую чувствительность к вибрациям установки. В отличие от схемы записи голограммы Денисюка, в этом случае пучки лучей делятся решеткой непосредственно перед тем, как попасть в светочувствительный слой. Главным требованием является отсутствие горизонтальных смещений дифракционной решетки G относительно светочувствительного слоя, что достаточно легко выполнить.

Получение голографических изображений объектов с помощью безопорных селектограмм [22–24] было проведено в толстослойных регистрирующих средах: в материале реоксан [25] излучением гелий-неонового лазера с длиной волны $0.63\,\mu$m и в менее чувствительном гелеобразном бихромированном желатине [26] излучением гелий-кадмиевого лазера с длиной волны $0.44\,\mu$m.

В эксперименте для увеличения интенсивности излучения объекта использовался описанный в статье [15]

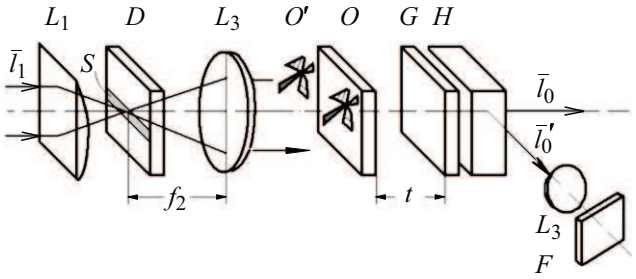


Рис. 6. Схема записи объектной волны и получения голографического изображения с помощью безопорной селектограммы в материале реоксан.

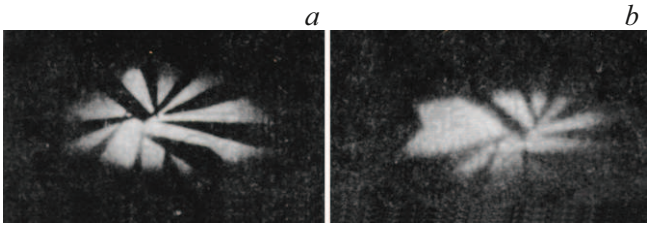


Рис. 7. Фотографии изображения объекта, наблюдаемого сквозь решетку (a), и голографического изображения, полученного с помощью безопорной селектограммой (b).

подход с предварительной фокусировкой объектной волны в область, где располагается фотопластинка.

Рассмотрим более подробно регистрацию объектной волны и получение голографического изображения с помощью безопорной селектограммы [22,23] при использовании светочувствительного материала реоксан. Реоксан представляет собой полимерную матрицу, в которой растворены антраценовое соединение, сенсибилизатор и кислород. Свет, поглощенный сенсибилизатором, за счёт триплет-триплетного переноса энергии инициирует переход молекул кислорода в химически активное синглетное состояние, в котором кислород окисляет антраценовое соединение. В результате в тех местах реоксана, на которые воздействовал свет, показатель преломления среды изменялся на величину порядка 10^{-4}. Поскольку толщина слоя реоксана может достигать величины порядка 1 mm, то даже весьма малое изменение показателя преломления оказывается достаточным для записи высокоэффективной голограммы. Оптическая схема регистрации безопорной селектограммы представлена на рис. 6.

Лучи l_1 излучения лазера фокусировались цилиндрической линзой L_1 в узкую горизонтальную полоску S на поверхность одномерного диффузора D, который рассеивал падающее на него излучение только в горизонтальной плоскости. Такой одномерный диффузор можно, например, получить нанесением вертикальных царапин на поверхности стекла. Одномерный диффузор также можно получить, используя голографическую запись крупнозернистого матового стекла по определенной оптической схеме [27]. Излучение, коллимированное расположенной на фокусном расстоянии f_2 от поверхности диффузора D линзой L_2, освещало объект-транспарант O (рис. 7, a). Прошедшее через объект излучение попадало на дифракционную решетку G, которая делила объектную волну l_0 на две компоненты. Одна компонента l_0 распространялась вдоль оптической оси системы, вторая компонента l_0' отклонялась в горизонтальной плоскости на угол $\alpha = 20^\circ$ относительно первоначального направления. Решетка G была получена посредством записи картины интерференции двух плоских волн на материале фирмы Dupont, чувствительном к красному свету.

Каждой из компонент объектной волны, претерпевшей дифракцию на решетке G, соответствовало свое мнимое изображение объекта. В частности, нулевому порядку соответствовало изображение O и дифрагированному порядку — изображение O'. Объемная картина интерференции, сформированных решеткой G компонент, регистрировалась в материале реоксан толщиной 1 mm. Излучение гелий-неонового лазера мощностью порядка 20 mW было сконцентрировано в полоске размером 10×40 mm. Время экспонирования составляло 90 min.

Получение голографических изображений осуществлялось с помощью той же оптической схемы, после того как объект O и решетка G были удалены. При этом для чистоты эксперимента диффузор сдвигался относительно своего первоначального положения. Селектограмма освещалась излучением, проходящим через область, где ранее находился объекта O. Это излучение формировало голографическое изображение O', которое фиксировалось фотокамерой, объектив которой L_3 фокусировал это изображение на фотопленку F. Фотография голографического изображения приведена на рис. 7, b.

Характерной особенностью полученного голографического изображения является то, что его нельзя наблюдать невооруженным глазом, как нельзя наблюдать невооруженным глазом изображение, полученное при просвечивании транспаранта плоской волной. Если транспарант просвечивается плоской волной, наблюдатель видит точечный источник, создавший эту плоскую волну. В случае безопорной селектограммы наблюдатель видит тонкую светящуюся полоску S излучения, сфокусированную на диффузор D. Однако при наблюдении через линзу L_3, сфокусированную на объект, полоска расширяется и трансформируется в голографическое изображение объекта.

Следует отметить, что при проведении данного эксперимента фильтрации подвергалось не излучение, рассеянное объектом, а излучение, освещающее объект. Такая схема, использующая особенности объекта-транспаранта, позволила исключить потери света и соответственно уменьшить экспозицию.

Также были проведены эксперименты по регистрации безопорных селектограмм в объемных слоях самопроявляющегося содержащего глицерин бихромированного желатина [28], который, в отличие от упомянутого выше

гелеобразного бихромированного желатина [26], характеризуется более высокой чувствительностью и длительным временем хранения записанной информации. Последний факт дает возможность проводить последующий анализ параметров, полученных с помощью безопорной селектограммы голографических изображений.

Оценка разрешающей способности голографических изображений, полученных с помощью безопорной селектограммы, в горизонтальном и вертикальном направлениях

Подробное рассмотрение разрешающей способности полученных с помощью безопорной селектограммы голографических изображений приведено в работах [13–16]. Поскольку ширина фильтрующей щели существенно определяет селективность системы, а следовательно, и разрешающую способность получаемого голографического изображения, то эта щель должна быть достаточно узкой, что существенно ограничивает светосилу системы.

В работе [22] проведена оценка разрешающей способности безопорных селектограмм при регистрации в толстослойной светочувствительной среде реоксан. Введение в схему регистрации селектограммы фильтрующей щели S приводит к анизотропии разрешения в полученном голографическом изображении. Поскольку механизмы формирования голографического изображения в горизонтальной и в вертикальной плоскостях в данном случае существенно отличаются, то в качестве объекта использовалась специальная мира (рис. 7, a), позволившая оценить разрешающую способность метода в разных направлениях.

В горизонтальном направлении разрешающая способность голографического изображения определяется значением угловой селективности трехмерной голограммы. В работе [21] было показано, что при условии малости (менее 5 %) дифракционной эффективности голограммы разрешающая способность в горизонтальном направлении определяется следующим выражением:

$$\Delta\alpha = \lambda/2d\,\mathrm{tg}(\alpha/2), \qquad (1)$$

где λ — длина волны света, d — толщина слоя светочувствительного материала, α — угол между интерферирующими пучками. В данном случае для $\lambda = 0.63\,\mu$m, $\alpha = 20^\circ$, $d = 1$ mm получим $\Delta\alpha$ порядка $6.3'$.

В вертикальном направлении селектограмма работает как камера-обскура, и ее угловая разрешающая способность определяется угловым размером ширины щели S. При ширине полоски S, равной 0.5 mm, и фокусном расстоянии линзы L_2, равном 90 mm, угловое разрешение по вертикали $\Delta\beta$ будет равно $20'$.

Для оценки разрешающей способности безопорной селектограммы, зарегистрированной в толстослойном

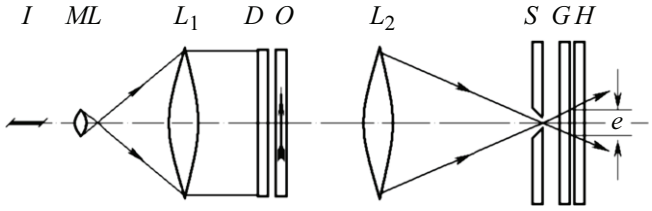


Рис. 8. Оптическая схема регистрации безопорной селектограммы в толстослойном самопроявляющемся бихромированном желатине, содержащем глицерин.

содержащем глицерин самопроявляющемся материале на основе бихромированного желатина [27], была использована оптическая схема регистрации безопорных селектограмм (рис. 8) с фокусировкой объектной волны в область светочувствительного слоя [29]. Данная оптическая схема позволила концентрировать энергию экспонирующего излучения на малом участке e светочувствительного материала H. Она отличается от схемы, представленной на рис. 6, фокусировкой излучения на щель S непосредственно перед решеткой G и светочувствительным материалом H.

Сформированная с помощью микрообъектива ML и линзы L_1 плоская монохроматическая волна падает на одномерный диффузор D, который рассеивает волну в горизонтальном направлении. Свет проходит объект-транспарант O и собирается с помощью цилиндрической линзы L_2 в узкую горизонтальную полоску, которая фильтруется щелью S для уменьшения искажений, внесенных неоднородностью структуры диффузора. Специальная дифракционная решетка G, расположенная непосредственно перед светочувствительным материалом H, расщепляет объектную волну только на две компоненты: $+1$-й и -1-й порядки дифракции. Картина интерференции этих компонент регистрируется в светочувствительном материале H. На стадии получения голографического изображения объект-транспарант и дифракционная решетка удаляются. Голографическое изображение объекта наблюдается при освещении голограммы рассеянным диффузором D светом.

Регистрация селектограмм осуществлялась излучением гелий-кадмиевого лазера мощностью 16 mW на длине волны $0.44\,\mu$m. В качестве объектов использовались транспаранты, представляющие собой систему регулярных прозрачных и непрозрачных полос различной пространственной частоты и отличающихся разным углом наклона полос относительно вертикали. Селектограммы представляли собой узкие полоски размером приблизительно 1×10 mm на поверхности светочувствительного материала. Толщина слоя материала порядка 0.15 mm. Ширина щели при записи селектограммы 0.5 mm. Восстановленные селектограммой изображения с помощью телевизионной камеры на основе ПЗС-матрицы (795×596 элементов) передавались на компьютер для обработки. Предварительное улучшение качества изоб-

ражения с целью повышения контраста или уменьшения шума не производилась. Оценка разрешающей способности в горизонтальном направлении по формуле (1) для $\lambda = 0.44\,\mu$m, $\alpha = 20^\circ$, $d = 0,15$ mm дает величину $\Delta\alpha$ порядка $30'$.

В вертикальном направлении угловая разрешающая способность селектограммы определялась угловым размером ширины щели. При ширине щели 0.5 mm и фокусном расстоянии линзы $L_2 = 200$ mm угловое разрешение $\Delta\beta$ будет равно $40'$.

В экспериментах по использованию толстослойных регистрирующих сред для регистрации объектной волны было показано существенное влияние ширины фильтрующей щели S на разрешающую способность голографического изображения. При удалении щели разрешение в полученном голографическом изображении резко ухудшается, что подтверждает фильтрующий эффект щели, являющейся особенностью метода селектограмм. Также было продемонстрировано существенное влияние на разрешающую способность метода толщины светочувствительной среды. Сравнение параметров $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ для двух исследованных толстослойных светочувствительных материалов подтвердило факт того, что лучшие результаты по разрешению дают среды с большей толщиной.

Выводы

Метод безопорных селектограмм не является столь универсальным, как голография. Голографические изображения, получаемые по этому методу, уступают по своим характеристикам (разрешение, дифракционная эффективность и т.д.) голографическим изображениям, полученным с помощью голограмм Денисюка. Метод также воспроизводит эффекты трехмерного восприятия полученного голографического изображения объекта только в горизонтальной плоскости. Также имеются сложности практического применения метода в связи с невысокой разрешающей способностью получаемого голографического изображения, обусловленной необходимостью использования фильтрующей щели. Эта щель должна быть достаточно узкой, что существенно ограничивает светосилу системы. Повышение светосилы системы требует схем регистрации с предварительной фокусировкой объектной волны в зону регистрации безопорной селектограммы. Однако для приложений, связанных с трехмерными дисплеями компьютеров, трехмерным телевидением и кинематографом, передачей изображений по линиям связи, компьютерной голографией, методы псевдоглубоких голограмм и селектограмм могут быть весьма полезными.

В то же время метод безопорных селектограмм имеет ряд преимуществ, основным из которых является существенное снижение требований к когерентности излучения, используемого при записи объектной волны и при получении голографического изображения. Это достигается благодаря тому, что объектный и опорный пучки взаимно когерентны, так как оба этих пучка образованы из излучения, рассеянного объектом. При этом разность хода лучей интерферирующих пучков минимальна. Снижению требований к когерентности записывающего излучения существенно способствует также и то, что область, где может существовать картина интерференции, максимально приближена к фотослою с помощью дифракционной решетки. Также достоинством безопорных селектограмм по сравнению с голограммой Денисюка является то, что безопорная селектограмма мало чувствительна к вибрациям элементов записывающей установки и смещениям объекта во время регистрации. Однако надо исключить смещение дифракционной решетки относительно светочувствительного материала во время регистрации.

Все рассмотренные в данном обзоре методы получения голографических изображений возникли в период, когда существовал явный дефицит в разработках и наличии для экспериментаторов толстослойных светочувствительных сред. Перечисленные преимущества метода безопорных селектограмм могут быть реализованы при использовании только толстослойных светочувствительных сред, развитие технологии получения которых будет существенно способствовать практическому использованию данного метода.

Следует отметить, что несмотря на снижение требований к когерентности записывающего излучения, проблема интерференционной записи произвольных трехмерных объектов остается достаточно сложной. Данный метод не компенсирует влияние пространственной некогерентности рассеянного объектом излучения, что приводит к взаимному стиранию интерференционных картин, образованных излучением достаточно удаленных точек объекта.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Ю.Н. Денисюк. ДАН СССР, **144** (6), 1275 (1962).
[2] E.N. Leith, J. Upatnieks. J. Opt. Soc. Am., **54** (11), 1295 (1964).
[3] S.A. Benton. J. Opt. Soc. Amer., **59** (10), 1545A (1969).
[4] Ю.Н. Денисюк. Письма в ЖТФ, **15** (8), 84 (1989).
[5] Ю.Н. Денисюк. ЖТФ, **60** (6), 59 (1990).
[6] Ю.Н. Денисюк, Н.М. Ганжерли. ЖТФ, **60** (11), 154 (1990).
[7] Yu.N. Denisyuk, N.M. Ganzherli. Proceedings SPIE, **1238**, 2 (1989).
[8] Yu.N. Denisyuk, N.M. Ganzherli. Opt. Eng., **31** (4), 731 (1992).
[9] Yu.N. Denisyuk, N.M. Ganzherli. Opt. Eng., **32** (5), 958 (1993).
[10] Ю.Н. Денисюк. Письма в ЖТФ, **18** (2), 15 (1992).
[11] Yu.N. Denisyuk, N.M. Ganzherli. Proceedings SPIE, **2043**, 224 (1993).

[12] Ю.Н. Денисюк, Н.М. Ганжерли. Письма в ЖТФ, **19** (17), 81 (1993).
[13] Yu.N. Denisyuk, N.M. Ganzherli. Proceedings SPIE, **1732**, 218 (1993).
[14] Ю.Н. Денисюк, Н.М. Ганжерли. Опт. и спектр., **75** (5), 1092 (1993).
[15] Ю.Н. Денисюк, Н.М. Ганжерли. ЖТФ, **64** (10), 124 (1994).
[16] Yu.N. Denisyuk, N.M. Ganzherli. Opt. Eng., **33** (10), 3307 (1994).
[17] H.J. Caulfield, J.J. Harris, J.G. Cobb. Proceedings IEEE, **55**, 1758 (1967).
[18] Ю.Н. Денисюк. Письма в ЖТФ, **21** (2), 51 (1995).
[19] Ю.Н. Денисюк. Опт. и спектр., **79** (5), 858 (1995).
[20] N.M. Ganzherli. Proc. SPIE, **404**, 357 (1995).
[21] Н.М. Ганжерли, Ю.Н. Денисюк. Опт. и спектр., **79** (4), 670 (1995).
[22] Ю.Н. Денисюк, Н.А. Савостьяненко. ЖТФ, **66** (7), 104 (1996).
[23] Yu.N. Denisyuk, N.A. Savostyanenko. Opt. Eng., **35** (2), 564 (1996).
[24] Yu.N. Denisyuk, N.M. Ganzherli, N.A. Savostyanenko. Proceedings SPIE, **2652**, 188 (1996).
[25] Г.И. Лашков, В.И. Суханов. Опт. и спектр., **44** (5), 365 (1978).
[26] Ю.Н. Денисюк, Н.М. Ганжерли, И.А. Маурер, С.А. Писаревская. Письма в ЖТФ, **23** (7), 62 (1997).
[27] Н.М. Ганжерли, Ю.Н. Денисюк, И.А. Маурер. Письма в ЖТФ, **29** (22), 53 (2003).
[28] Ю.Н. Денисюк, Н.М. Ганжерли, И.А. Маурер, С.А. Писаревская. Письма в ЖТФ, **25** (5), 64 (1999).
[29] Н.М. Ганжерли, И.А. Маурер, Д.Ф. Черных. Письма в ЖТФ, **32** (19), 23 (2006).