

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ И СПЕКЛ-ЭКРАНЫ ДЛЯ ПРОЕКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2005 г. Н. М. Ганжерли, канд. физ.-мат. наук; Ю. Н. Денисюк, академик РАН;

И. А. Маурер, канд. техн. наук; Д. Ф. Черных, канд. техн. наук

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

E-mail: nina@holo.ioffe.rssi.ru

Представлены варианты экранов для проекции изображений. В первом случае рассматривается голографический экран для проекции горизонтальных аспектов трехмерной сцены. Экран трансформирует светящуюся точку в вертикальную светящуюся диффузную линию. При проекции на такой экран аспектов трехмерной сцены наблюдатель видит локализованное на экране двумерное изображение, конфигурация которого изменяется в зависимости от точки наблюдения таким же образом, как при наблюдении реального трехмерного объекта. Во втором случае исследуются различные варианты аксиальных диффузных экранов, зарегистрированных на основе голограммы Габора.

Коды OCIS: 110.6880.

Поступила в редакцию 25.11.2004.

1. Создание голографического экрана для проекции аспектов трехмерной сцены

Ранее сообщалось о методе проекции трехмерного изображения с помощью аспектов сцены, сфокусированных в точки [1–3]. На первом этапе регистрируется система аспектов изображаемой сцены, которая создается сканирующим пучком лазера. На этапе проекции аспекты просвечиваются сфокусированным в точку лазерным пучком. Сканируя экран, такой пучок образует матрицу светящихся точек. В результате можно видеть локализованное на экране двумерное изображение, конфигурация которого изменяется в зависимости от точки наблюдения таким же образом, как при наблюдении реального трехмерного объекта. При этом возникает иллюзия трехмерности проецируемого изображения. В случае дисплея, который воспроизводит только горизонтальные параллаксы трехмерной сцены, зона видения должна быть расширена в вертикальном направлении с помощью специального одномерного диффузного экрана.

Рассмотрим в качестве экрана специальный голографический оптический элемент, совмещающий в себе линзу и одномерный диффузор. Схема регистрации экрана представлена на рис. 1а [4]. На стадии восстановления при освещении голограммы (экрана) расходящейся световой волной, исходящей из точки S , голограмма восстанавливает вертикально расположенную светящуюся диффузную линию. Если голограмму восстанавливать системой расходящихся световых волн, исходящих из точек, расположенных вдоль прямой горизонтальной линии LL (рис. 1б), то голограмма восстановит систему вертикальных диффузных линий DL , образующих зону видения VZ . Наблюдатель h через это окно может наблюдать голографический экран в виде светяще-

гося эллипса H . Размер зоны видения определяется длиной восстанавливающей горизонтальной линии LL и размерами голограммы.

Голограммы экрана регистрировались на отечественных голографических фотопластинках ПФГ-03М и проявлялись в рекомендованном для этих пластинок голографическом проявителе ГП-3.

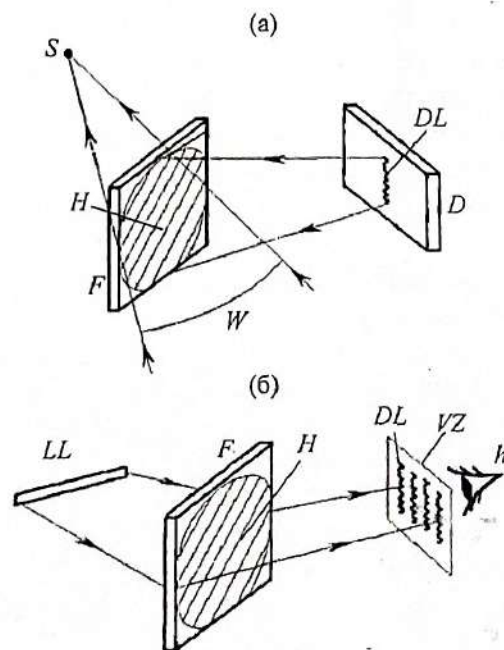


Рис. 1. Схема регистрации (а) и реконструкции (б) голографического экрана, воспроизводящего горизонтальный параллакс. W – сходящийся в точку S волновой фронт, D – диффузор, на который цилиндрической линзой проецируется вертикальная световая линия DL , F – светочувствительный материал с зарегистрированной голограммой H , LL – восстанавливающая световая линия, VZ – зона видения, сформированная системой восстановленных вертикальных диффузных линий DL , h – наблюдатель.

Рассмотрим, как работает голографический экран, если на него будут проецироваться аспекты трехмерной сцены, полученные с помощью голографии. С этой целью снимались линейные голограммы Лейта трехмерной сцены, которая состояла из нескольких объектов и зеркал, используемых для дополнительной подсветки и усиления эффекта глубины сцены [5]. На фотопластинке регистрировалась серия линейных голограмм, каждая из которых фиксировала либо последовательное изменение взаимного расположения объектов трехмерной сцены, либо новый трехмерный объект.

Каждый элементарный участок линейной голограммы может рассматриваться как аспект трехмерной сцены. Линейные голограммы освещались пучком в виде светящейся линии. Восстановленное изображение направлялось в качестве референтного пучка на голографический экран, в плоскости которого наблюдалось одно из поперечных сечений трехмерной сцены. При этом от места положения экрана зависело, какой из участков трехмерной сцены будет сфокусирован. Движение глаз наблюдателя в горизонтальном направлении вдоль зоны видения даёт угол обзора сцены. Недостатком схемы можно считать небольшой угол обзора сцены в горизонтальном направлении, обусловленный как геометрией данной схемы регистрации, так и малым действующим размером голограммы, который определяется условиями освещения, дающими реальную экспозицию.

На рис. 2 приведены фотографии голографического экрана для трех положений глаза наблюдателя в зрительной зоне VZ . Фотографии передают эффект трехмерности изображения, возникающий при перемещении глаз наблюдателя в пределах зоны видения в горизонтальном направлении. Фотографическая иллюстрация выбрана для среднего положения фокуса. Процесс фоторегистрации результатов вносит дополнительную расфокусировку, обусловленную малой глубиной резкости изображаемого пространства, присущей для режима макросъемки.

2. Осевой диффузный направленный экран на основе пропускающей голограммы Габора

2.1. Осевой голографический экран на основе тонкой центрированной голограммы

Осевая голограмма, предложенная Д. Габором в 1948 г. исторически явилась первым известным типом голограмм [6]. Как одна из разновидностей тонких голограмм, она, как известно, кроме основного изображения объекта восстанавливает также и дополнительные, которые накладываются на основное изображение, что ведет к его существенным искажениям. Вместе с тем, осевая голограмма хорошо сопрягается с оптическими системами, большинство из которых осесимметричны. В случае, когда голограмма используется для проекции изображения через экран, осевая схема проекции позволяет избежать искажений проецируемого изображения, обусловленных наклоном проецирующих лучей по отношению к экрану. Использование осевой голограммы является одним из немногих путей создания осевого голографического экрана.

Для регистрации осевого голографического экрана была выбрана оптическая схема на базе интерферометра Маха-Цендера, который служит для организации двух независимых падающих на голограмму соосно объектного и референтного пучков. Таким образом, исключается появление тени объекта (диффузора) на голограмме. На этапе реконструкции голограмма восстанавливает изображение диффузора, играющего роль зоны видения, через которую видны спроецированное на экран изображение, а также мнимое сопряженное изображение диффузора, изображение точечного референтного источника и изображение гало.

Проецируемое на голограмму-экран изображение фактически не подвергается искажениям, за исключением появления в центре экрана изображения восстанавливающего голограмму точечного источника. Это изображение несколько размыто в связи с тем,



Рис. 2. Фотографии изображений трехмерной сцены на голографическом экране для трех положений глаза наблюдателя в зоне VZ (см. рис. 1б).

что точечный источник находится на достаточно большом расстоянии от экрана, в то время как система, регистрирующая изображение на экран, была сфокусирована на плоскость экрана. К отрицательной роли лучей, формирующих гало и сопряженное изображение, следует отнести то, что значительная часть этих лучей проходит мимо зоны видения, уменьшая энергетическую эффективность проектора.

2.2. Осевой голографический экран на основе тонкой центрированной голограммы

Следует отметить, что при наблюдении сквозь зону видения сопряженное изображение диффузора играет роль некоторого окна, через которое изображение сцены кажется более ярким, что приводит к неравномерности освещения поля зрения. К сожалению, это сопряженное изображение в отличие от нулевого порядка и гало не может быть исключено за счет фазовой модуляции структуры осевой голограммы.

Единственным способом исключения влияния сопряженного изображения является перемещение его положения таким образом, чтобы оно не влияло на распределение интенсивности в поле зрения наблюдателя. Положение сопряженного изображения можно определить с помощью правила Габора, который показал, что, для того чтобы определить положение сопряженного изображения, достаточно отразить объект в референтной волне, как в зеркале [7]. Анализируя с помощью этого правила возможные положения сопряженного изображения диффузора, нетрудно прийти к заключению, что сопряженное изображение совпадает с положением основного изображения только в случае, когда при записи голо-

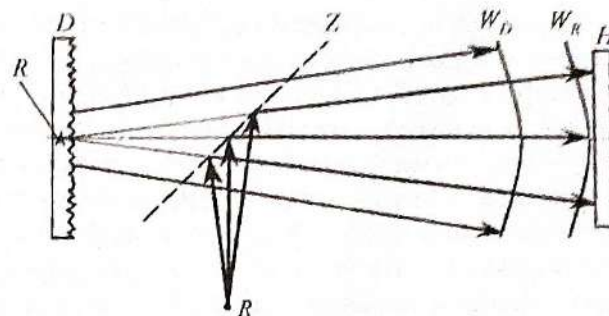


Рис. 3. Схема записи центрированной осевой голограммы. D – объект (диффузор); R – референтный источник, изображение которого введено в центр диффузора полупрозрачным зеркалом Z ; W_D и W_R – объектная и референтная волны, картина интерференции которых записывается в виде голограммы H .

граммы референтный источник располагается в центре регистрируемого диффузора (рис. 3). Из рисунка следует, что при реконструкции такой голограммы сопряженное изображение объекта D^* должно совпадать с объектом D , поскольку объект D находится в центре сферической волны W_R , которая при построении сопряженного изображения D^* принимается за зеркало, в котором следует изобразить объект D . Рассмотренную выше голограмму, отличающуюся тем, что референтный источник располагается в центре регистрируемого объекта, мы назвали центрированной голограммой.

Схема проекции изображения через голографический экран, выполненный на основе осевой центрированной голограммы, приведена на рис. 4. Линза L_p проектора P проецирует изображение сцены I на голографический экран H , основанный на использовании центрированной голограммы. Проекция осуществляется посредством сферической волны

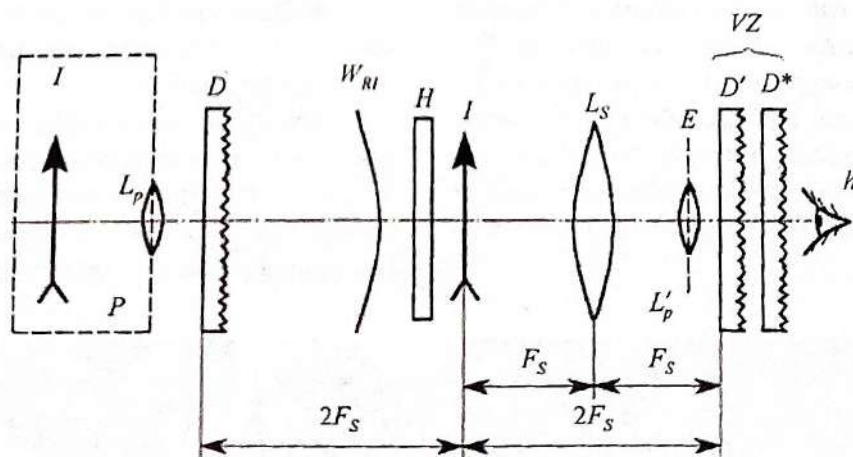


Рис. 4. Схема проекции изображения I с помощью проектора на основе центрированной голограммы. L_p – линза проектора P , проецирующая изображение I на голограмму диффузора H ; D' – восстановленное изображение диффузора, возникающее при восстановлении голограммы; D^* – сопряженное изображение диффузора; W_{RI} – восстанавливающая волна, интенсивность которой модулирована изображением; H – голограмма диффузора (экран); I – изображение, спроецированное на экран H ; L_s – линза, проецирующая восстановленное изображение наблюдателю h ; L'_p – изображение линзы проектора; E – гало; VZ – зона видения, через которую наблюдатель смотрит на изображение I , которое кажется расположенным на бесконечности, так как изображение I удалено от линзы L_s на фокусное расстояние этой линзы F_s .

W_{RI} , интенсивность которой модулирована проецируемым изображением. Экран H восстанавливает изображение диффузора D' , а также совпадающее с ним сопряженное изображение этого диффузора D^* . Кроме того, если нулевой порядок не подавлен, экран формирует изображение линзы проектора L_p . Наблюдатель h рассматривает изображение на экране H через изображения D' и D^* диффузора D , сформированные голограммой-экраном H .

Центрированная голограмма записывалась и восстанавливалась по рассмотренной выше схеме. Говоря о распределении интенсивности в зоне видения VZ , следует сказать, что в центре ее наблюдается нулевой порядок. Сопряженное изображение диффузора или какие-либо другие посторонние изображения отсутствуют, как это и следует из принципа действия голограммы этого типа.

При проекции изображения на поверхность экрана H и наблюдении его через зону видения VZ неоднородности освещенности зоны видения практически не ведут к ухудшению однородности освещенности проецируемого изображения.

3. Осевой диффузный экран на основе безопорной объемной голограммы

Развивая схему регистрации осевых голограмм Габора для создания осевых экранов для проекции изображений, мы пришли к идее использования безопорной объемной голограммы. Фазовая модуляция в объемной среде при регистрации безопорной голограммы диффузора может привести к подавлению нулевого порядка в восстановленном изображении. При записи такого экрана диффузор освещается когерентным излучением. В результате взаимной интерференции излучения, рассеянного всеми точками диффузора, возникает сложная объемная картина интерференции, которая записывается в объемном светочувствительном материале. Полученная таким образом структура известна как безопорная голограмма.

Каждую из точек записанного на такой голограмме объекта можно рассматривать в качестве рефе-

рентного источника по отношению ко всем остальным точкам объекта. Голограмму в целом можно представить как сумму субголограмм. Каждая из таких субголограмм может быть считана независимо одной из точек диффузора, которая в данном случае может рассматриваться как референтный источник для данной субголограммы.

На этапе реконструкции голограмма, на которой записано изображение диффузора, освещается излучением точки, положение которой совпадает с положением одной из точек записанного на голограмме диффузора. Взаимодействуя с соответствующей субголограммой, это излучение восстанавливает мнимое изображение диффузора. Линза, расположенная за голограммой, преобразует мнимое изображение диффузора в действительное изображение. В случае проекции двумерных изображений на экран изображение диффузора выполняет роль зоны видения.

В качестве регистрирующей среды был использован разработанный нами ранее самопроявляющийся толстослойный материал на основе бихромированного желатина, чувствительный в синей области спектра [8–10]. Толщина слоя составляла 0,10–0,15 мм. Особенностью материала является то, что зарегистрированная на нем информация проявляется непосредственно во время экспозиции и автоматически фиксируется после хранения в темноте в течение нескольких суток. Таким образом процесс регистрации голограммы диффузора можно контролировать непосредственно во время ее экспозиции.

Схема экспериментальной установки, использованной для записи и восстановления таких экранов, приведена на рис. 5. Линза L_0 фокусирует излучение лазера в точку S и далее создает на диффузоре D освещенный участок с диаметром E_D , равным 10 мм. Диффузор D , выполненный по специальной технологии, рассеивает свет в пределах весьма малого угла порядка 0,03 рад. В результате диаметр E_H освещенного участка на поверхности светочувствительной среды F составляет порядка 20 мм. Применение направленного диффузора позволяет

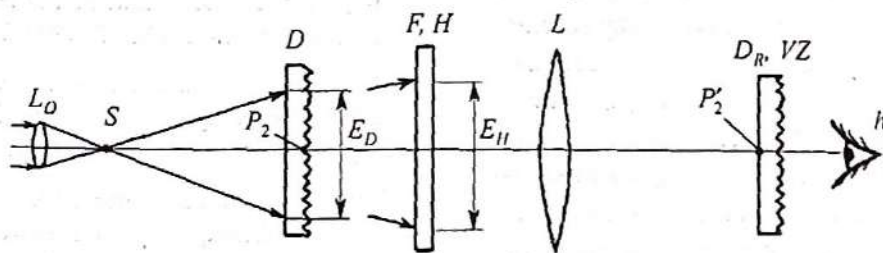


Рис. 5. Схема экспериментальной установки, использованной для записи и восстановления осевых экранов. L_0 — линза, фокусирующая излучение лазера в точку S ; D — узконаправленный диффузор с освещенным участком диаметром E_D ; F — светочувствительная среда, в плоскости которой диффузное световое пятно имеет диаметр E_H ; L — линза, формирующая при реконструкции голограммы действительное изображение диффузора D_R , который выполняет роль зоны видения VZ для наблюдателя h .

полностью использовать энергию излучения, экспонирующего светочувствительный материал $E_{\text{ан}}$. В частности, в первые минуты после начала экспозиции в центре плоскости зоны видения VZ был виден только нулевой порядок — яркая точка P'_2 , представляющая собою изображение точки P_2 , сформированное линзой L . По мере увеличения экспозиции точечное изображение нулевого порядка размывается и зона видения заполняется равномерным диффузным светом. Какие-либо точечные изображения, соответствующие высшим порядкам дифракции, не возникали. Сопряженное изображение диффузора и гало также отсутствовали.

Наиболее существенной особенностью полученной безопорной объемной голограммы диффузора является то, что, будучи записанной излучением с $\lambda_1 = 442$ нм, она допускает восстановление излучением с $\lambda_2 = 633$ нм. Это явление, противоречащее законам селективности объемных голограмм, по видимому, объясняется тем, что, кроме субголограммы, соответствующей точке P_2 , голограмма H содержит очень большое количество субголограмм, соответствующих другим точкам диффузора D . Способность объемной безопорной голограммы быть восстановленной излучением с длиной волны, существенно отличающейся от длины волны излучения, использованного при ее записи, фактически означает, что голограмма может быть записана в области чувствительности фотоматериала, а затем использована для проекции цветных изображений.

Выводы

Рассмотрен голографический экран для проекции горизонтальных аспектов трехмерной сцены. Экран создает иллюзию наблюдения на нем трехмерного изображения, конфигурация которого изменяется в зависимости от точки наблюдения, таким же образом, как при наблюдении реального трехмерного объекта. Взяв за основу тонкую осевую голограмму Габора, мы последовательно разработали новый вид голограмм, которые позволяют компенсировать отдельные искажения проецируемого двумерного изображения, характерные для этой простейшей осевой голограммы. В частности, был предложен и исследован осевой голографический экран на основе центрированной голограммы, который позволяет устранить искажения изображения, вносимые сопряженным изображением, сопровождающим реконструкцию тонких голограмм.

Также был предложен и исследован осевой голографический экран на основе безопорной толстослойной голограммы, который не пропускает нулевого порядка, не создает гало и сопряженного изображения. Кроме того, такой экран допускает запись в одном диапазоне спектра, а реконструкцию в другом. Это весьма существенная особенность данного экрана облегчает выбор фотоматериала для его записи, а также допускает проекцию цветного изображения через него.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 04-02-17593) и гранта Президента Российской Федерации по поддержке ведущих научных школ (грант № НШ-98, 2003-2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Denisjuk Y.N., Markov V.B., Ganzherli N.M. Three-dimensional image projection with aspects focused in spots // Proc. SPIE, 1997. V. 3011. P. 45-52.
2. Денисюк Ю.Н., Марков В.Б., Ганзгерли Н.М. Проекция трехмерного изображения методом аспектов, сфокусированных в точки // Опт. и спектр. 1998. Т. 84. № 1. С. 104-109.
3. Денисюк Ю.Н., Ганзгерли Н.М., Орлов В.В., Бруй Е.Б., Савостьяненко Н.А. Проекция трехмерного изображения при помощи сфокусированных в точки аспектов изображаемой сцены // Опт. и спектр. 1999. Т. 86. № 5. С. 864-872.
4. Ганзгерли Н.М., Черных Д.Ф. Создание системы аспектов трехмерной сцены // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 19. С. 84-87.
5. Денисюк Ю.Н., Ганзгерли Н.М., Черных Д.Ф. Голографический экран для проекции трехмерного изображения методом аспектов, сфокусированных в точки // ЖТФ. 2003. Т. 73. В. 2. С. 101-103.
6. Gabor D. Microscopy by reconstructed wave-fronts // Proc. Roy. Soc. (London). A. 1949. Vol. 97. P. 454-487.
7. Gabor D. Microscopy by reconstructed wave-fronts // Proc. Phys. Soc. B. 1951. V. 64. P. 449.
8. Денисюк Ю.Н., Ганзгерли Н.М., Маурер И.А., Писаревская С.А. Толстослойный глицеринсодержащий бихромированный желатин для записи объемных голограмм // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 4. С. 62-65.
9. Denisjuk Yu.N., Ganzherli N.M., Maurer I.A., Pisarevskaya S.A. Thick-layered gelatin for volume hologram recording // Proc. SPIE. 1997. V. 3011. P. 244-247.
10. Денисюк Ю.Н., Ганзгерли Н.М., Маурер И.А., Писаревская С.А. Бихромированный желатин как среда для записи объемных голограмм // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 5. С. 64-69.