

РАСЧЁТ И ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВОЙ И СПЕКТРАЛЬНОЙ СЕЛЕКТИВНОСТЕЙ ДЛЯ ПОЛНОПАРАЛЛАКСНЫХ ГОЛОГРАММНЫХ СТЕРЕОГРАММ

Д.С. Лушников¹, А.Ю. Жердев¹, В.В. Маркин¹, С.Б. Одинокоев¹, А.В. Смирнов²

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия,

² АО «НПО «Криптен», Дубна, Россия

Аннотация

В статье выведены и проанализированы зависимости угловой и спектральной селективностей от углов падения опорного пучка при получении отражательных и пропускающих цветных голограмм. Показано, что для получения цветных голограммных стереограмм наиболее предпочтительно использовать метод получения отражательных стереограмм. Связано это с тем, что при сопоставимых угловых селективностях отражательной и пропускающей цветных голограмм у отражательной цветной голограммы значительно выше спектральная селективность на всех длинах волн ее получения (для всех ее цветовых компонентов). Были разработаны метод и аппаратура для одноэтапного цифрового получения цветных полнопараллаксных голограммных стереограмм с формированием в плоскости голограммы безрастрового изображения. Были получены образцы цветной полнопараллаксной защитной голограммной стереограммы с эффектом изменения изображения («флип-флоп» эффектом). Качество восстановленного изображения подтвердило высокую спектральную и угловую селективность для данного типа голограмм.

Ключевые слова: защитные голограммы; цветные голограммы; мультиплексные голограммы; голограммные стереограммы.

Цитирование: Лушников, Д.С. Расчёт и исследование угловой и спектральной селективностей для полнопараллаксных голограммных стереограмм / Д.С. Лушников, А.Ю. Жердев, В.В. Маркин, С.Б. Одинокоев, А.В. Смирнов // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 802–809. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-802-809.

Введение

Голограммная стереограмма (ГС) представляет тип голограммы, формирующей при восстановлении массив наложенных двумерных изображений объекта, каждое из которых является изображением, наблюдаемым с определенного направления, или ракурса. При рассмотрении такого многокурсного изображения глаза наблюдателя видят два различных ракурса изображения, что создает эффект наблюдения объемного изображения объекта. При смещении наблюдателя в зоне формирования ракурсов пары наблюдаемых ракурсных изображений меняются, и наблюдается поворот объекта. При записи однопараллаксных голограмм этот поворот наблюдается только в одной, как правило, горизонтальной плоскости. Полнопараллаксные голограммы создают эффект поворота в обеих плоскостях, горизонтальной и вертикальной.

1. Расчёт угловой и спектральной селективности

К числу основных параметров голограмм обоих типов (отражательных и пропускающих) относятся угловая δ_α и спектральная δ_λ селективности голограмм. При получении голограммы с использованием безусадочного фотоматериала угловая селективность (δ_α) определяет угловую ширину контура дифракционной эффективности η при изменении угла падения α восстанавливающего пучка излучения относительно угла падения α_0 при получении голограммы, вторая (δ_λ) – спектральную ширину контура дифракционной эффективности η при изменении длины волны λ восстанавливающего пучка излучения относительно длины волны λ_0 при получении голограммы.

Проведем ориентировочную численную оценку угловой и спектральной селективности, учитывая, что в качестве регистрирующего материала при получении голограмм будет использоваться фоточувствительная среда с толщиной слоя 10 мкм (например, галогенидосеребряная фоточувствительная среда типа ПФГ-03Ц, производимых компанией «Славич»). Значения параметров определяем на уровне 0,5.

Для фазовой отражательной голограммы величина δ_α в регистрирующей среде может быть определена [1, 2] как

$$\delta_\alpha = \xi_r \lambda_0 / (2\pi n T \cos \Theta_0),$$

где ξ_r – пропорциональный угловому отклонению δ_α от угла Брэгга параметр, выбираемый из приведенных на рис. 1 графиков зависимостей относительной дифракционной эффективности η/η_0 (η и η_0 – соответственно дифракционные эффективности при отклонении от угла Брэгга на величину δ и при нулевом отклонении от этого угла); n – средний показатель преломления регистрирующей среды; T – толщина регистрирующей среды; Θ_0 – угол Брэгга в регистрирующей среде.

Величину угловой селективности в воздухе определим как

$$\delta_\alpha^{\text{air}} = n \delta_\alpha. \quad (1)$$

При этом спектральная селективность δ_λ связана с угловой селективностью δ_α [1, 2] соотношением

$$\delta_\lambda = \delta_\alpha \lambda_0 / \text{tg } \Theta_0. \quad (2)$$

Графики зависимостей η/η_0 (ξ_r) на рис. 1 приводятся для различных значений параметра v_r , пропорционального амплитуде вариаций показателя пре-

ломления, образующихся в результате экспонирования и обработки голограммы, и определяющего взаимодействие восстанавливающего и восстановленного излучений.

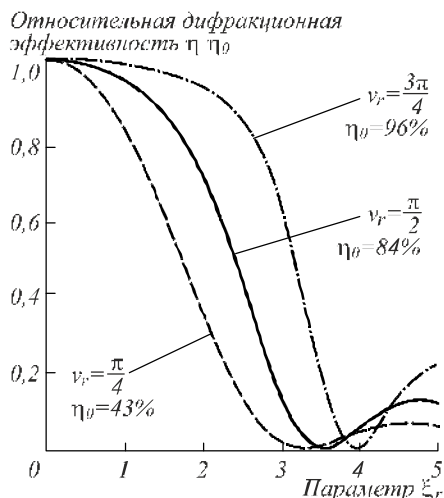


Рис. 1. Зависимость относительной дифракционной эффективности η/η_0 отражательной голограммы без потерь от ξ_r для различных параметров ν_r

Оценка параметров проводится при использовании регистрирующих слоев ПФГ-03Ц толщиной $T = 10$ мкм (стандартная толщина), значения $n = 1,52$ для трех длин волн ($\lambda_{01} = 440$ нм, $\lambda_{02} = 532$ нм и $\lambda_{03} = 660$ нм), являющихся длинами волн лазера Geola RGB-β-1064, используемого при получении цветных голограмм. При величине параметра $\nu_r = \pi/4$, обеспечивающего значение $\eta_0 = 43\%$, и при принятии в качестве допустимой величины $\eta/\eta_0 = 0,5$ из графика получим значение $\xi_r = 1,7$. При получении отражательных голограмм по контрнаправленной схеме при углах падения предметного пучка $\alpha_0 = 0^\circ$ и опорного пучка β_0 значение угла Θ_0 в регистрирующей среде определяется в виде

$$\Theta_0 = 90^\circ - \arcsin(\sin \beta_0 / n) / 2.$$

Для фазовой пропускающей голограммы величина δ_α в регистрирующей среде может быть определена как [2]:

$$\delta_\alpha = \xi_r \lambda_0 / (2\pi n T \sin \Theta_0).$$

Расчет проводится при ранее принятых для отражательной голограммы значениях T, n, λ_0 . Значение ξ_r , определенное из соответствующих графиков, показанных на рис. 2, такое же, как и для отражательной голограммы. Величина параметра $\nu = \pi/4$, обеспечивающего значение $\eta/\eta_0 = 0,5$, будет в данном случае составлять 1,4.

Для пропускающей голограммы величина Θ_0 в среде определяется как

$$\Theta_0 = 90^\circ - \arcsin(\sin \beta_0 / n) / 2.$$

Величину угловой селективности в воздухе δ_α^{air} и спектральную селективность δ_λ здесь определяем также в соответствии с (1) и (2).

В табл. 1–4 и на рис. 3–6 представлены результаты расчетов величин угловой δ_α и спектральной δ_λ селективностей соответственно для отражательной и пропускающей голограмм для трёх указанных выше длин волн получения и восстановления голограмм.

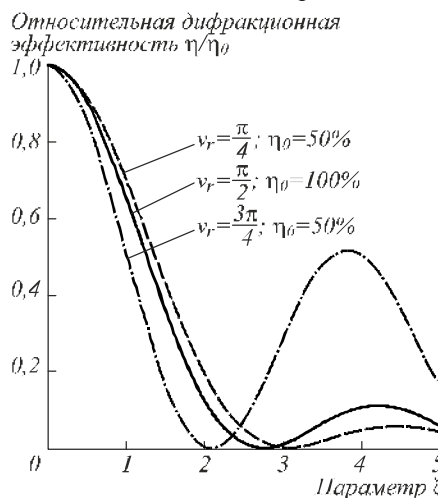


Рис. 2. Зависимость относительной дифракционной эффективности η/η_0 пропускающей голограммы без потерь от ξ для различных параметров ν_r

Табл. 1. Определение величин угловой селективности δ_α для различных углов падения опорного пучка при получении (отражательная голограмма)

Угол падения опорного пучка $\beta_0, ^\circ$	Угловая селективность $\delta_\alpha, ^\circ$		
	$\lambda_1 = 440$ нм	$\lambda_2 = 532$ нм	$\lambda_3 = 660$ нм
30	8,178	9,888	12,267
35	7,095	8,579	10,643
40	6,299	7,616	9,448
45	5,694	6,885	8,541
50	5,226	6,319	7,839
55	5,226	5,875	7,289
60	4,57	5,526	6,856
65	4,344	5,253	6,517
70	4,171	5,043	6,256
75	4,041	4,886	6,062
80	3,952	4,779	5,928
85	3,900	4,715	5,850

Табл. 2. Определение величин спектральной селективности δ_λ для различных углов падения опорного пучка при получении (отражательная голограмма)

Угол падения опорного пучка $\beta_0, ^\circ$	Спектральная селективность $\delta_\lambda, \text{нм}$		
	$\lambda_1 = 440$ нм	$\lambda_2 = 532$ нм	$\lambda_3 = 660$ нм
30	6,990	10,219	15,728
35	7,023	10,267	15,802
40	7,060	10,321	15,885
45	7,099	10,378	15,973
50	7,140	10,438	16,065
55	7,181	10,498	16,157
60	7,221	10,557	16,248
65	7,259	10,613	16,334
70	7,293	10,662	16,410
75	7,322	10,704	16,474
80	7,344	10,736	16,523
85	7,357	10,755	16,553

Расчеты проведены в диапазоне изменения углов падения опорных пучков при получении и восстанавливающих пучков 30–85°. Все расчеты проведены для ориентаций поверхности равных фаз либо параллельно плоскости голограммы (для отражательных голограмм), либо перпендикулярно ей (для пропускающих голограмм). Однако при интерференции пучков со сложными волновыми фронтами данные поверхности могут быть ориентированы произвольно и следует применять более сложные вычисления, описанные в [3].

Табл. 3. Определение величин спектральной селективности $\delta\lambda$ для различных углов падения опорного пучка при получении (пропускающая голограмма)

Угол падения опорного пучка $\beta_0, \text{ }^\circ$	Спектральная селективность $\delta\lambda, \text{ нм}$		
	$\lambda_1 = 440 \text{ нм}$	$\lambda_2 = 532 \text{ нм}$	$\lambda_3 = 660 \text{ нм}$
30	201,124	294,023	452,528
35	150,684	220,285	452,528
40	118,128	172,692	265,789
45	96,009	140,355	216,019
50	80,409	117,550	180,920
55	69,115	101,040	155,510
60	60,805	88,891	136,811
65	54,653	79,897	122,968
70	50,130	73,285	112,792
75	46,891	68,551	105,506
80	44,714	65,368	100,607
85	43,459	63,532	97,782

Табл. 4. Определение величин угловой селективности $\delta\alpha$ для различных углов падения опорного пучка при получении (пропускающая голограмма)

Угол падения опорного пучка $\beta_0, \text{ }^\circ$	Угловая селективность $\delta\alpha, \text{ }^\circ$		
	$\lambda_1 = 440 \text{ нм}$	$\lambda_1 = 440 \text{ нм}$	$\lambda_1 = 440 \text{ нм}$
30	6,735	8,143	10,102
35	5,843	7,065	8,765
40	5,187	6,272	7,781
45	4,689	5,670	7,034
50	4,304	5,204	6,456
55	4,002	4,838	6,002
60	3,764	4,551	5,646
65	3,578	4,326	5,367
70	3,435	4,153	5,152
75	3,328	4,024	4,992
80	3,255	3,935	4,882
85	3,212	3,883	4,818

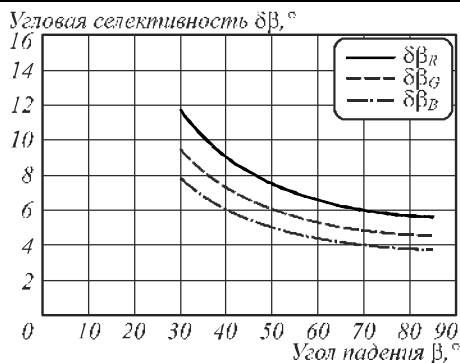


Рис. 3. Графики зависимостей угловой селективности $\delta\alpha$ от угла падения опорной волны для отражательных голограмм

Из представленных таблиц видно, что спектральная селективность у отражательных голограмм высока, что обеспечивает качественное восстановление с голограммы всех цветовых компонентов. При этом она практически не зависит от изменений угла падения опорного пучка при получении голограммы для каждой из цветовых компонентов голограммы.

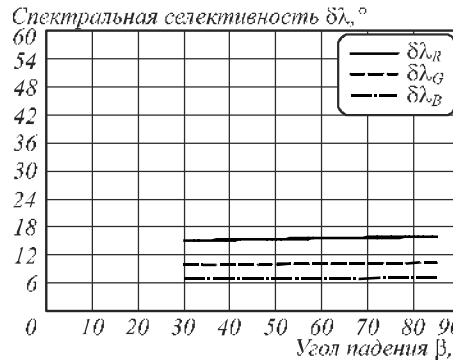


Рис. 4. Графики зависимостей спектральной селективности $\delta\lambda$ от угла падения опорной волны для отражательных голограмм

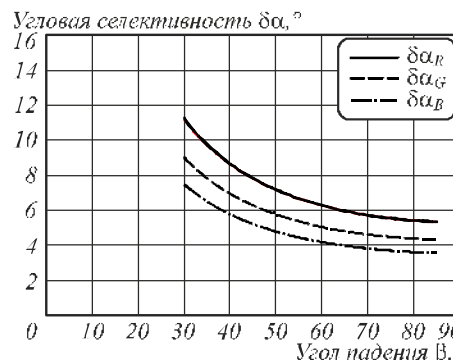


Рис. 5. Графики зависимостей угловой селективности $\delta\alpha$ от угла падения опорной волны для пропускающих голограмм

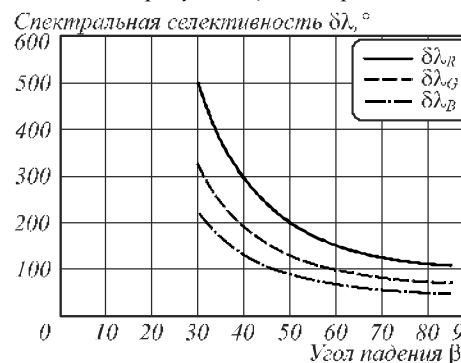


Рис. 6. Графики зависимостей спектральной селективности $\delta\lambda$ от угла падения опорной волны для пропускающих голограмм

У пропускающей же голограммы спектральная селективность при малых углах падения опорного пучка при получении голограммы крайне низка, что не позволяет получить качественное восстановление всех цветовых компонентов. По мере увеличения значения угла падения опорного пучка при получении пропускающей голограммы спектральная селективность растет, однако она остается достаточно не-

большой даже при крайне больших значениях угла падения опорного пучка.

Это говорит о том, что качественного восстановления цветного изображения с пропускающей голограммы, сопоставимого с качеством восстановления цветного изображения с отражательной голограммы, добиться невозможно. Пропускающая голограмма восстанавливает цвета намного менее «чистые», чем отражательная. При этом угловые селективности у пропускающей и отражательной голограмм практически одинаковы, что говорит о том, что «размытие» изображения при использовании для восстановления неточечного источника у данных типов голограмм будет практически одинаково.

2. Обзор аппаратуры получения голограммных стереограмм

Современные высокопроизводительные системы записи ГС являются цифровыми, использующими в предметном пучке ЖК ПВМС с компьютерным последовательным вводом записываемых изображений. Широко распространенными голографическими системами записи стереограмм являются одноэтапные растровые системы. В растровых голографических системах, называемых иногда голографическими принтерами, голограмма и, соответственно, изображение объекта формируется в виде одномерного растра при записи однопараллаксных стереограмм [4, 5] или двухмерного растра при записи полнопараллаксных голограмм [6]. В таких системах каждый элемент растра на голограмме обеспечивает восстановление всего набора ракурсов для записываемого элемента изображения объекта. Запись одного такого элемента представляет регистрацию в фоточувствительной среде поля интерференции опорного и предметного пучков, а предметный пучок при этом должен нести в виде пространственно разделенных субпучков информацию обо всех ракурсах регистрируемого элемента изображения. Соответственно, и само выводимое на ЖК ПВМС в предметном пучке изображение не может быть просто изображением объекта в одном определенном ракурсе, а будет представлять сложное, компьютерно-синтезированное по определенному алгоритму изображение. Это требует при записи стереограммы дополнительной предварительной обработки ракурсных изображений и усложняет аппаратуру записи.

В аппаратуре такого типа очевидным является требование минимизации размеров элемента растра на голограмме до размеров, при которых этот элемент растра не разрешается глазом с расстояния наблюдения голограммы. При нормальном разрешении глаза в одну угловую минуту и при рассмотрении голограммы с расстояния в 400 мм размер элемента растра не должен превышать 0,1 мм. Получить элемент растра с такими размерами только с помощью установленной перед регистрирующей средой диафрагмой или щелью проблематично и достигается усложнением оптической схемы аппаратуры. Необходимо, кроме того, иметь в виду ухудшение качества восстановленного изображе-

ния из-за рассеяния излучения на растровой структуре голограммы, а также то, что растровый характер изображения не позволяет включать в изображения мелкоструктурные защитные элементы, например, микро-текстовые или френелевские элементы.

Запись полноцветных ГС предполагает использование в аппаратуре лазерной системы, генерирующей излучение на красной, зеленой и синей длинах волн. В системах записи растровых ГС при этом осуществляется либо мультиплексная запись элемента растра на различных длинах волн [6, 7], либо параллельная запись элементов растра на различных длинах волн [8]. Вариант аппаратуры с мультиплексной записью, требующий объединения пучков трех длин волн в одном канале, сопровождается повышением требований к оптической системе и из-за этого ее усложнением, а также падением дифракционной эффективности ГС вследствие мультиплексирования. Вариант аппаратуры с параллельной записью сопровождается ее громоздкостью.

3. Разработанная схема получения голограммных стереограмм

Все отмеченные выше недостатки растровых систем привели к созданию принципиально отличающейся системы записи ГС, особенно имеющей преимущества при записи защитных стереограмм, когда нет необходимости в получении голограмм больших размеров, но требуется повышенное качество изображения для обеспечения возможности включения в изображение мелкоструктурных защитных элементов, как это отмечалось выше. Оптическая схема разработанной системы записи ГС, реализующей одноэтапную цифровую запись цветных голограмм с формированием в плоскости голограммы безрастрового изображения, представлена на виде сверху (в горизонтальном сечении) на рис. 7. Здесь представлена система в варианте записи отражательных ГС.

Излучение твердотельного импульсного лазера *I* (Geola RGB Alfa A1), дающего три отдельных пучка с длинами волн 440, 532 и 660 нм, с помощью системы дихроичных зеркал 3–6 объединяется в единый пучок. В состав лазера входит блок затворов 2, открываемых на время экспозиции от общей системы управления (СУ), а также полуволновые пластинки в каждом из пучков, обеспечивающие необходимую ориентацию плоскости поляризации. В данной системе устанавливается вертикальная плоскость колебаний электрического вектора. После отражения зеркалом 7 объединенный пучок излучения с помощью полупрозрачного зеркала 8 делится на два пучка: предметный (ПП) и опорный (ОП).

При экспонировании на определенной длине волны, которое на каждой из них осуществляется последовательно, в ход ПП устанавливается соответствующая полуволновая пластинка 9, 10 или 11, переводящая колебание электрического вектора в горизонтальную плоскость. Смена пластинок осуществляется устройством смещения 12, управляемым от СУ.

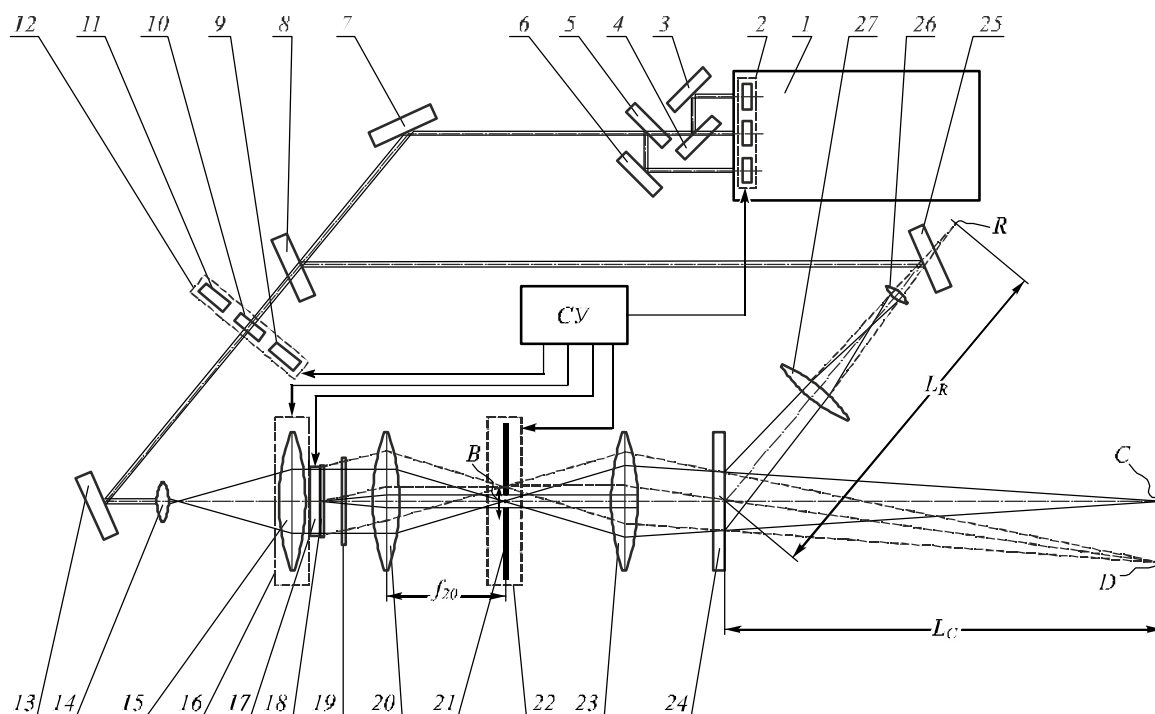


Рис. 7. Оптическая схема для получения ГС, реализующая одноэтапную цифровую запись цветных ГС с формированием в плоскости голограммы безрастрового изображения

После отражения ПП от зеркала 13 телескопическая система линз 14 и 15 формирует коллимированный пучок с размерами, необходимыми для равномерной засветки рабочего окна жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света (ПВМС) 17. Основная функциональная часть оптической системы ПП, включающая представленные на рис. 1 элементы 15–24, обеспечивает последовательный ввод на ПВМС от СУ регистрируемых ракурсов изображений и проекционный перенос с помощью объективов 20 и 23 этих изображений в плоскость регистрирующей среды 24.

За ПВМС в непосредственном с ним контакте помещается диффузор 18 и далее по ходу лучей анализатор 19. Анализатор пропускает излучение с вертикальной ориентацией электрического вектора и обеспечивает максимальный контраст наблюдаемого за ПВМС изображения. В задней фокальной плоскости объектива 20 установлена диафрагма 21. В этой плоскости формируется пространственно-частотный спектр (ПЧС) поля излучения за ПВМС, сложный по структуре и протяженный по размерам в связи со сложной и тонкой структурой ПВМС. Диафрагма 21 вырезает центральную информативную часть спектра и играет таким образом роль пространственного фильтра.

В целом пучок излучения за объективом 23, формирующим изображение на регистрирующей среде, является пучком, сходящимся в некоторой точке на определенном расстоянии за регистрирующей средой. Это расстояние соответствует расстоянию, с которого производится наблюдение изображения на голограмме при его восстановлении. В рассматриваемой реализации аппаратуры это расстояние составляет $L_C = 400$ мм. На рис. 7 сплошными линиями представ-

лен ход лучей в ПП при записи центрального (осевого) ракурса, сходящихся за регистрирующей средой в точке С на оси системы. Из хода лучей видим, что центр пучка, выделяемого диафрагмой 21 (точка В), и центр пучка, сходящегося за регистрирующей средой 23 (точка С), являются оптически сопряженными. Использование диффузора 18 обеспечивает размытие центрального максимума ПЧС в пределах апертуры диафрагмы 21 и тем самым выравнивает распределение интенсивности излучения в области схождения ПП за регистрирующей средой.

Смена изображений, вводимых на ПВМС, сопровождается поперечным смещением линзы 15 с помощью механизма перемещения 16. Это обеспечивает изменение направления пучка излучения, падающего на ЖК ПВМС и объектив 20, и, соответственно, изменение направления пучка излучения, формирующего изображение на регистрирующей среде за объективом 23. В связи со смещением при этом ПЧС в фокальной плоскости объектива 20 производится соответствующее перемещение фильтрующей диафрагмы 21 с помощью механизма перемещения 22. При этом смещается в поперечном направлении и точка схождения ПП за регистрирующей средой (из точки С в точку D). Ход лучей, формирующих изображение в плоскости регистрирующей среды 24 при вводе на ПВМС произвольного ракурса изображения объекта и соответствующем смещении линзы 15, на рис. 7 представлен пунктирными линиями.

После отражения от полупрозрачного зеркала 8 лазерное излучение в ветви опорного канала зеркалом 25 отражается в направлении регистрирующей среды 24. ОП, падающий на регистрирующую среду, с помощью линз 26 и 27 формируется в гомоцентри-

ческий расходящийся пучок с центром расхождения R , отстоящим от регистрирующей среды на расстояние $L_R = 1$ м. Это расстояние соответствует расстоянию, на котором располагается восстанавливающий источник излучения при рассмотрении ГС. В рассматриваемой реализации системы, предназначенной для записи защитных ГС, имеющих относительно небольшие размеры (порядка нескольких см) и рассматриваемых с небольшого расстояния, принятого выше равным $L_C = 400$ мм, восстанавливающий источник излучения находится также на относительно небольшом расстоянии от голограммы. Принимаем здесь это расстояние равным $L_C = 500$ мм. Угол падения ОП на регистрирующую среду составляет примерно 45° .

В процессе единичного экспонирования в фоточувствительной среде регистрируется поле интерференции ОП и ПП, где последний формирует в этой среде изображение объекта в определенном ракурсе на одной из трех длин волн. Полный цикл записи ГС включает последовательную регистрацию всего набора ракурсов на каждой длине волны, в результате чего ГС является мультиплексной. Совокупность всех точек схождения ПП за регистрирующей средой на расстоянии от нее образует виртуальную двухмерную регулярную решетку.

При рассмотрении записанной ГС сама голограмма, восстанавливающий источник излучения и наблюдатель располагаются в одной вертикальной плоскости. При этом их относительное положение должно соответствовать относительному положению регистрирующей среды, центра R гомоцентрического ОП и точки S схождения ПП на стадии записи ГС, которые на рис. 1 располагаются в плоскости рисунка. В области расположения глаз наблюдателя восстанавливается действительное изображение указанной выше двухмерной регулярной решетки, откуда следуют требования к ее параметрам на стадии записи. Так, шаг этой решетки не должен превышать диаметр зрачка наблюдателя (2–3 мм). Общий размер решетки в одном направлении, соответствующем направлению линии, соединяющей глаза наблюдателя (направление, перпендикулярное плоскости рис. 1), должен существенно превышать величину базы глаз, равную примерно 60 мм. Размер этой решетки в другом направлении, перпендикулярном первому, должен быть достаточным для обеспечения эффекта поворота рассматриваемого объекта при качании головы в вертикальной плоскости и может быть несколько меньшим.

При значительном числе последовательных экспонирований фоточувствительного материала, равном произведению количества ракурсов для записываемого объекта на число цветовых компонентов, такая мультиплексная запись всегда приводит к существенному снижению дифракционной эффективности в восстановленном изображении как отдельного ракурса или его цветового компонента, так и всей ГС. Для некоторых фоточувствительных сред, например, для фотополимеров, данный способ экспонирования

фоточувствительного слоя принципиально не подходит, что связано с образованием и записью действительной интерференционной картины после каждого экспонирования и дифракцией излучения на структуре этой картины при последующих экспозициях.

В отношении рассмотренной выше оптической схемы аппаратуры для записи полнопараллаксных ГС заметим, что она может быть использована и при записи однопараллаксных ГС с обеспечением эффекта стереоскопического восприятия в одной горизонтальной плоскости. При этом для обеспечения достаточного угла обзора ГС в вертикальном направлении должен использоваться диффузор 18 с широкой индикатрисой рассеяния в соответствующем направлении, на рис. 1 совпадающем с плоскостью рисунка, а диафрагма 21 должна быть щелевой.

Кроме того, аппаратура может быть представлена в варианте записи пропускающих ГС. Для этого часть системы ОП в составе элементов 26, 27, формирующая его геометрию в области регистрирующей среды 24, должна быть симметрично развернута в плоскости рисунка относительно плоскости регистрирующей среды.

На рис. 8 представлены схема изменения изображений и фотографии изображений, восстановленных с полученной цветной голограммной стереограммы при наблюдении ее с различных направлений.

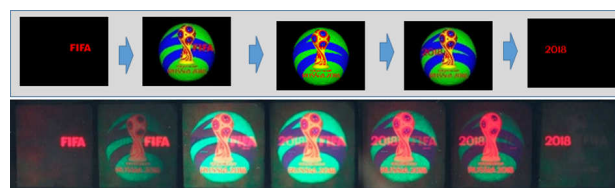


Рис. 8. Схема смены изображений и фотографии изображений, восстановленных с цветной голограммной стереограммы

Заключение

Определены зависимости угловой и спектральной селективностей от углов падения опорного пучка. Показано, что отражательные голограммы имеют в 10–20 раз более высокую спектральную селективность, чем пропускающие, при углах падения восстанавливающего пучка более 40° . Это обеспечивает наблюдение более чистых цветов в изображении, восстановленном отражательными голограммами. По результатам анализа разработаны метод и аппаратура для одноэтапной цифровой получения цветных полнопараллаксных голограммных стереограмм с формированием в плоскости голограммы безрастрового изображения и получены образцы голограмм данного типа. Разработанная одноэтапная схема получения ГС позволила сократить время их получения в 2–3 раза.

Благодарности

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения Соглашения о предоставлении субсидии № 14.574.21.0066 (ID RFMEFI57414X0066)

Литература

1. **Горноста́й, А.В.** Метод расчёта дифракционного делителя пучков лазерного излучения со спектральной селекцией на основе бихромированной желатины. / А.В. Горноста́й, С.Б. Одинокóв // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 1. – С. 45-50. - DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1- 45-50.
2. Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин; пер. с англ. под ред. Ю.И. Островского. – М.: Мир, 1973. – 686 с.
3. **Kogelnik, H.** Scattered wave theory for thick hologram gratings / H. Kogelnik // The Bell System Technical Journal. – 1969. – Vol. 48, Issue 9. – P. 2909-2947. - DOI: 10.1002/j.1538-7305.1969.tb01198.x.
4. **U.S. Patent 7,046,409B2 G 03 H1/26, G 03 B35/00.** Holographic stereogram forming apparatus / N. Kihara, filed of April 22, 2004, published of May 16, 2006.
5. **U.S. Patent 6,559,983 G 03 H1/26, B 41 J3/407, H 04 N5/89.** Holographic stereogram printing system, holographic stereogram printing method and holographic device / T. Toyoda, N. Kihara, A. Shiracura, filed of March 1, 2001, published of May 06, 2003.
6. **U.S. Patent 6,330,088 B1 G 03 H1/24, G 03 H1/26, G 03 H1/20.** Holographic stereogram printing system, holographic stereogram printing method and holographic device / M. Klug, M. Holzbach, A. Ferdman, filed of June 17, 1998, published of December 11, 2001.
7. **U.S. Patent 6,930,811 G03H1/26, G02B13/00, B41J2/44, G03H1/12, G02B13/22, G03H1/24, G03H1/16.** Holographic printer / D. Brotherton-Ratcliffe, , filed of December 9, 2000, published of August 16, 2005.
8. **U.S. Patent 7,161,722 G 03 H1/26, G 03 H1/20.** Holographic printer / D. Brotherton-Ratcliffe, A. Rodin, filed of October 16, 2002, published of January 9, 2007.

Сведения об авторах

Лушников Дмитрий Сергеевич родился в 1978 г., окончил в 2002 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Научный сотрудник НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области оптической голографии. E-mail: dmlu41@yandex.ru.

Жердев Александр Юрьевич родился в 1987 г., окончил в 2011 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Научный сотрудник НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области оптической голографии. E-mail: zherdev@bmstu.ru.

Маркин Владимир Васильевич родился в 1939 г., окончил в 1962 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Ведущий инженер НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 30 научных работ в области оптической голографии. E-mail: ymark.39@mail.ru.

Одинокóв Сергей Борисович родился в 1950 г., окончил в 1973 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ. Автор более 180 научных работ в области оптической голографии. E-mail: odinokov@bmstu.ru.

Смирнов Андрей Валентинович родился в 1980 г., окончил в 2002 г. Международный университет природы общества и человека «Дубна». Начальник голографической лаборатории АО «НПО «Криптен». E-mail: smirnov_av@krypten.ru.

ГРНТИ: 00.00.00

Поступила в редакцию 30 сентября 2016 г. Окончательный вариант – 11 ноября 2016 г.

**CALCULATION OF ANGULAR AND SPECTRAL SELECTIVITY
FOR FULL-PARALLAX HOLOGRAPHIC STEREOGRAMS**

D.S. Lushnikov¹, A.Y. Zherdev¹, V.V. Markin¹, S.B. Odinokov¹, A.V. Smirnov²

¹ *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia,*

² *JSC “RPC “Krypten”, Dubna, Russia*

Abstract

In this paper, dependencies of the angular and spectral selectivity on the incidence angle of the reference beam in a scheme for obtaining reflection and transmission holograms are obtained and analyzed. It is shown that for obtaining color holographic stereograms a scheme for obtaining transmission holograms is more suitable. While the angular selectivity of reflection and transmission color holograms is the same, the spectral selectivity of the reflection hologram is much higher at all wavelengths of recording. A method and equipment for one-step digital recording of color full-parallax holographic stereograms with rasterless image are developed. Samples of color full-parallax security holographic stereograms with a “flip-flop” effect in the image were obtained. The quality of the reconstructed image verifies high spectral selectivity for this type of holograms.

Keywords: security holograms, color holograms; multiplex holograms; holographic stereograms

Citation: Lushnikov DS, Zherdev AY, Markin VV, Odinkov SB, Smirnov SV. Calculation of angular and spectral selectivity for full-parallax holographic stereograms. *Computer Optics* 2016; 40(6): 802–809. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-802-809.

Acknowledgements: This work was performed at the Bauman MSTU with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under contract No. 14.574.21.0066 (Grant No. RFMEFI57414X0066).

References

- | | |
|--|--|
| <p>[1] Gornostay AV, Odinkov SB. A method to design a diffractive laser beam splitter with color separation based on bichromated gelatine. <i>Computer Optics</i> 2016; 40(1): 45-50. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-45-50.</p> <p>[2] Collier R, Burckhardt C, Lin L. <i>Optical Holography</i>. New York, London: Academic Press; 1971.</p> <p>[3] Kogelnik H. Coppled wave theory for thic hologram gratings. <i>The Bell System Technical Journal</i>, 1969; 48(9): 2909-2949. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1969.tb01198.x.</p> | <p>[4] Kihara N. Holographic stereogram forming apparatus. US Patent 7046409 B2, 16.05.2006.</p> <p>[5] Toyoda T, Kihara N, Shiracura A. Holographic stereogram printing system, holographic stereogram printing method and holographic device. US Patent 6559983, 06.05.2003.</p> <p>[6] Klug M, Holzbach M, Ferdman A. Method and apparatus for recording one-step, full-color, full-parallax, holographic stereograms. US Patent 6330088 B1, 11.12.2001.</p> <p>[7] Brotherton-Ratcliffe D, Vergnes FMR, Rodin A, Grichine M. Holographic printer. US Patent 6930811, 16.08.2005.</p> <p>[8] Brotherton-Ratcliffe D, Rodin A. Holographic printer. US Patent 7161722, 09.01.2007.</p> |
|--|--|

Authors' information

Dmitrii S. Lushnikov (b. 1978) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2002. Researcher in the Radio-electronics and Laser Engineering Research Institute of Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 40 publications in the field of optical holography. E-mail: dmlu41@yandex.ru.

Alexander Y. Zherdev (b. 1987) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2011. Researcher in the Radio-electronics and Laser Engineering Research Institute of Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 40 publications in the field of optical holography. E-mail: zherdev@bmstu.ru.

Vladimir V. Markin (b. 1939) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1962. Lead Engineer of the Radio-electronics and Laser Engineering Research Institute of Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 30 publications in the field of optical holography. E-mail: vmark.39@mail.ru.

Sergey B. Odinkov (b. 1950) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1973. D. Sci. (Eng.), professor of the Laser and Optoelectronic Systems department of Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 180 publications in the field of optical holography. E-mail: odinokov@bmstu.ru.

Andrey V. Smirnov (b. 1980) graduated from International University of Nature Society and Human "Dubna". Head of holographic lab JSC "RPC "Krypten". E-mail: smirnov_av@krypten.ru.

Received September 30, 2016. The final version – November 11, 2016.