

25. Влияние спектрально-угловой селективности объемной цветной защитной голограммной стереограммы на процесс восстановления 3D изображения

Д. С. Лушников¹, С. Б. Одинок¹, В. В. Маркин¹, А. Ю. Жердев¹, А. В. Смирнов²

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

² АО «НПО «Криптен», Дубна, Россия

В статье представлена двухэтапная схема получения объемных цветных защитных голограммных стереограмм. Данные голограммы являются цифровыми голограммами. На первом этапе производится запись Н1-голограммы. На втором этапе записывается итоговая голограммная стереограмма. При восстановлении 3D изображений с голограммных стереограмм в плоскости зрачков глаз наблюдателя восстанавливается изображение Н1-голограммы. Качество 3D изображений, восстанавливаемых с голограммных стереограмм, напрямую зависит от степени размытия изображения Н1-голограммы. В статье показаны математические расчеты, описывающие влияния спектральной и угловой селективностей объемной цветной защитной голографической стереограммы на процесс восстановления 3D изображений (степень размытия изображения Н1-голограммы). Показано, что получение защитных элементов, таких как флип-флоп эффект, для данного типа голограмм, имеет более выраженный эффект в вертикальной плоскости, чем в горизонтальной. Это связано с большим влиянием спектральной и угловой селективностей в вертикальной плоскости, чем в горизонтальной при восстановлении изображений. Также в статье представлены фотографии изображений, восстановленных с объемной цветной защитной голограммной стереограммы, которые подтверждают корректность представленных расчетов.

Ключевые слова: Защитные голограммы, Стереограммы, 3D изображение.

Цитирование: Лушников, Д. С. Влияние спектрально-угловой селективности объемной цветной защитной голограммной стереограммы на процесс восстановления 3D изображения / Д. С. Лушников, С. Б. Одинок, В. В. Маркин, А. Ю. Жердев, А. В. Смирнов // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 115—119.

Введение

На рис.1 схематично представлен двухэтапный процесс получения голограммных стереограмм (рис. 1а и 1б), а также процесс восстановления изображения с голограммной стереограммы (рис. 1в). Оптические схемы получения подобных голограмм представлены в [1, 2].

В настоящей статье проведены расчеты для отражательной голограммной стереограммы Н2. При этом приняты следующие обозначения:

- λ — длина волны излучения источника;
- d — период дифракционной структуры, рассматриваемой цветовой составляющей голографического изображения в сечении фотоэмульсионного слоя, параллельном его поверхности (далее — поверхностный период);
- T — толщина фотоэмульсионного слоя;

- d_n — период дифракционной структуры в сечении фотоэмульсионного слоя, перпендикулярном направлению страт в этом слое;

- α_1 и α_2 — соответственно угол падения на голограмму восстанавливающего излучения и угол дифракции восстановленного излучения;

- L — расстояние, с которого рассматривается восстановленное изображение (данное расстояние равно расстоянию от объекта до первичной голограммы Н1);

- t — шаг расположения восстановленных в плоскости наблюдения изображений апертур, соответствующих отдельным ракурсам (далее — апертур ракурсов);

- θ_0 — угол Брэгга или угол скольжения пучка относительно направления страты в фоточувствительной среде при выполнении условия Брэгга;

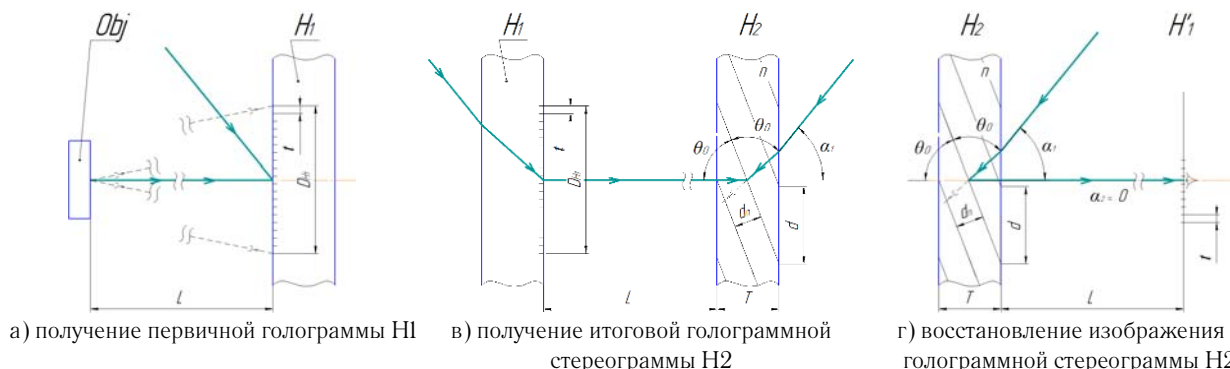


Рис. 1. Этапы получения голограммной стереограммы и восстановление с нее изображения

- δ_θ — значение угловой селективности дифракционной структуры рассматриваемой цветовой составляющей голографического изображения (на уровне 0,5) по параметру θ_0 ;

- δ_α и δ_λ — соответственно значения угловой и спектральной селективностей дифракционной структуры рассматриваемой цветовой составляющей голографического изображения по параметрам α_1 и λ ;

- $D_{НП}$ — размер зоны, занимаемый всеми апертурами ракурсов, зарегистрированными на первичной голограмме НП.

1. Оценка влияния спектральной и угловой селективностей на качество восстанавливаемого изображения

1.1. Влияние спектральной и угловой селективностей при расчете в меридиональном сечении при записи голограммной стереограммы

Проведено рассмотрение в меридиональном сечении голограммы, на стадии записи голограммы включающем опорный пучок, угол падения которого составляет $\alpha_1 = 45^\circ$, и предметный пучок с углом падения $\alpha_2 = 0^\circ$. На стадии восстановления меридиональное сечение включает восстанавливающий и дифрагированный пучки с теми же углами падения и дифракции (для голограммы без усадки светочувствительного слоя*). Далее, анализ будем проводить для зеленой цветовой составляющей голографического изображения, полученной при $\lambda = 532$ нм, с восстановлением изображения апертур ракурсов в соответствии со схемой записи на расстоянии $L = 400$ мм и расстоянии между апертурами $t = 5$ мм.

Поверхностный период d дифракционной структуры, ответственной за формирование рассматриваемой цветовой составляющей голографического изображения определим из уравнения дифракционной решетки

$$\lambda = d(\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1). \quad (1)$$

При принятых значениях параметров получаем $d = 0,75$ мкм.

Для дальнейшего рассмотрения практическое значение имеют параметры δ_α и δ_λ . В [3] приводятся соотношения для δ_λ и δ_θ в виде

$$\delta_\lambda = \frac{\xi_r \lambda^2}{2\pi n T \sin \theta_0} \quad (2)$$

и

$$\delta_\theta = \frac{\delta_\lambda \operatorname{tg} \theta_0}{\lambda} \quad (3)$$

Значение угла Брэгга θ_0 из геометрических соотношений при $\alpha_2 = 0^\circ$ определяется как

$$\theta_0 = 90^\circ - 0,5 \arcsin \frac{\sin \alpha_1}{n}, \quad (4)$$

откуда интересующее нас значение $\delta_\alpha = \delta_{\alpha_1}$ получаем в виде

$$\delta_\alpha = 2n\delta_\theta \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \alpha_1}{n}\right)^2} \cdot \cos \alpha_1. \quad (5)$$

При принятых значениях $\xi_r = 1,7$ (определено экспериментально), $n = 1,52$ и $T = 10$ мкм (показатель преломления и толщина фотоэмульсионного слоя ПФГ-03Ц производства «Славич») из (4) получаем $\theta_0 = 76,14^\circ$ и из (2) $\delta_\lambda = 5,2$ нм. Далее из (3) с учетом найденного значения δ_λ получаем $\delta_\theta = 2,3^\circ$ и из (5) $\delta_\alpha = 3,81$ и $\delta_\theta \approx 8,8^\circ$.

1.2. Влияние спектральной и угловой селективностей при расчете в меридиональном сечении восстановления изображения

Рассмотрение визуального восприятия голограммы с записью многоакурсного изображения с учетом полученных значений δ_α и δ_λ изначально приводится в предположении точечного источника восстанавливающего излучения со сплошным спектром излучения. При этом очевидно, что для фиксированного относительного пространственного положения элементов рассмотрения: источник восстанавливающего излучения, центр голограммы, глаза наблюдателя — можно видеть восстановленное изображение в спектральном диапазоне шириной $\Delta\lambda = \delta_\lambda = 5,2$ нм с центральной длиной волны $\lambda = 532$ нм.

Влияние спектральной селективности. Уширение размера апертуры ракурса. При попадании в глаз излучения всех спектральных составляющих в этом диапазоне оно будет восприниматься наблюдателем как излучение, близкое к монохроматическому, но приведет к наложению в зоне зрачка наблюдателя некоторого дополнительного числа апертур ракурсов N_1 и к соответствующему размытию изображения.

Ввиду относительной малости значения $\Delta\lambda$ с учетом постоянной величины α_1 из (1) для соответствующего углового сдвига $\Delta\alpha_2$ изображений зрачков можно получить соотношение

$$\Delta\alpha_2 = \Delta\lambda / d \cos \alpha_2 \quad (6)$$

и с учетом углового расстояния между апертурами

$$\alpha_t = t/L \quad (7)$$

число наблюдаемых наложенных апертур N_1 будет

$$N_1 = \Delta\alpha_2 / \alpha_t. \quad (8)$$

Из (8) с учетом (6) и (7) и при $\cos \alpha_1 \approx 1$ получаем

$$N_1 = \Delta\lambda L / dt. \quad (9)$$

При принятых ($L = 400$ мм, $t = 5$ мм) и найденных значениях, входящих в (9) величин, получаем $N_1 \approx 0,55$. Таким образом, при использовании для восстановления голографического изображения полихроматического источника излучения в рассматриваемом случае будет иметь место наложение не более двух соседних апертур ракурсов, что при несущественно различающихся контурах изображений в этих ракурсах не

приведет к заметному размытию наблюдаемого голографического изображения. Другими словами, эффектами, обусловленными использованием полихроматического источника восстанавливающего излучения, при определенной выше спектральной селективности голограммы можно пренебречь.

Влияние угловой селективности. Определение возможного количества наблюдаемых ракурсов. Наблюдение в рассматриваемом меридиональном сечении при указанном выше фиксированном положении элементов рассмотрения других ракурсов изображения в предположении использования для восстановления монохроматического точечного источника возможно путем смещения плоскости изображения апертур ракурсов относительно зрачка наблюдателя. Данное смещение осуществляется путем поворота голограммы относительно оси, перпендикулярной рассматриваемому сечению и проходящей через центр голограммы. В области номинального положения этот поворот эффективен в пределах угла $\Delta\alpha_1$, равного значению угловой селективности δ_α в этом сечении. При этом общий диапазон поворота формируемого голограммой изображения апертур зрачков в плоскости глаз наблюдателя Δ_2 будет

$$\Delta_2 = \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2. \quad (10)$$

Значение составляющей $\Delta\alpha_2$ поворота при относительной малости $\Delta\alpha_1$ из (1) при $\alpha_2 = 0$ может быть определено как

$$\Delta\alpha_2 \approx \Delta\alpha_1 \cos \alpha_1. \quad (11)$$

При $\Delta\alpha_1 = \delta_\alpha = 8,8^\circ$ из (11) получаем $\Delta\alpha_2 \approx 6,2^\circ$ и из (10) $\Delta_2 = 15^\circ$.

Возможное число наблюдаемых таким образом ракурсов N_2 яркостью на уровне 0,5 аналогично (8) с учетом (7) будет определяться как

$$N_2 = \frac{\Delta_2}{\alpha_i} = \frac{\Delta_2 L}{t}. \quad (12)$$

Из (11) с учетом (10) получаем $N_2 \approx 21$. Обеспечиваемые таким образом линейные размеры зоны

наблюдения в области расположения глаз наблюдателя будут $N_2 t = 105$ мм, что вполне достаточно.

Влияние угловой селективности. Определение переналожения ракурсов. Результат от использования при восстановлении протяженного источника излучения можно представить в виде формирования в зоне зрачка глаза некоторого числа N_3 наложенных ракурсов. При этом и здесь эффективные угловые размеры источника $\Delta\alpha_1$ излучения определяются найденной выше угловой селективностью голограммы $\Delta\alpha_1 = \delta_\alpha$. Поэтому и здесь, воспользовавшись для определения величины углового смещения апертур ракурсов $\Delta\alpha_2$ соотношением (11), получаем найденное выше значение $\Delta\alpha_2 \approx 6,2^\circ$.

Аналогично (8) с учетом (7) число наложенных ракурсов N_3 определяем как

$$N_3 = \frac{\Delta\alpha_2}{\alpha_i} = \frac{\Delta\alpha_2 L}{t}. \quad (13)$$

При принятых и найденных значениях входящих в (13) величин получаем $N_2 \approx 9$. Таким образом, при использовании для восстановления голографического изображения протяженного источника излучения в рассматриваемом случае будет иметь место наложение значительного числа соседних ракурсов, что определено приведет к заметному размытию наблюдаемого голографического изображения.

1.3. Влияние спектральной и угловой селективностей при расчете в сагиттальном сечении восстановлении

Проведенное выше рассмотрение относится к меридиональному сечению голограммы. Геометрия записи и восстановления голограммы в проекции на сагиттальное сечение, перпендикулярное к первому и включающем на стадии записи предметный пучок, а на стадии наблюдения голографического изображения дифрагированный пучок, принципиально отличается от геометрии записи и восстановления в меридиональном сечении. В этой проекции все углы падения и угол дифракции близки к 90° .

Табл. 1. Визуально наблюдаемые защитные эффекты в виде флип-флоп эффектов по цвету и изображению

Тип флип-флоп эффекта	Изображение, восстанавливаемое с голограммы в исходном положении	Изображение, восстанавливаемое с голограммы в промежуточном положении	Изображение, восстанавливаемое с голограммы в итоговом положении
Флип-флоп эффект по цвету — одно и то же изображение меняет цвет при повороте голограммы вокруг горизонтальной оси			
Флип-флоп эффект по цвету и изображению — два разных изображения сменяют цвет и друг друга при повороте голограммы вокруг горизонтальной оси			

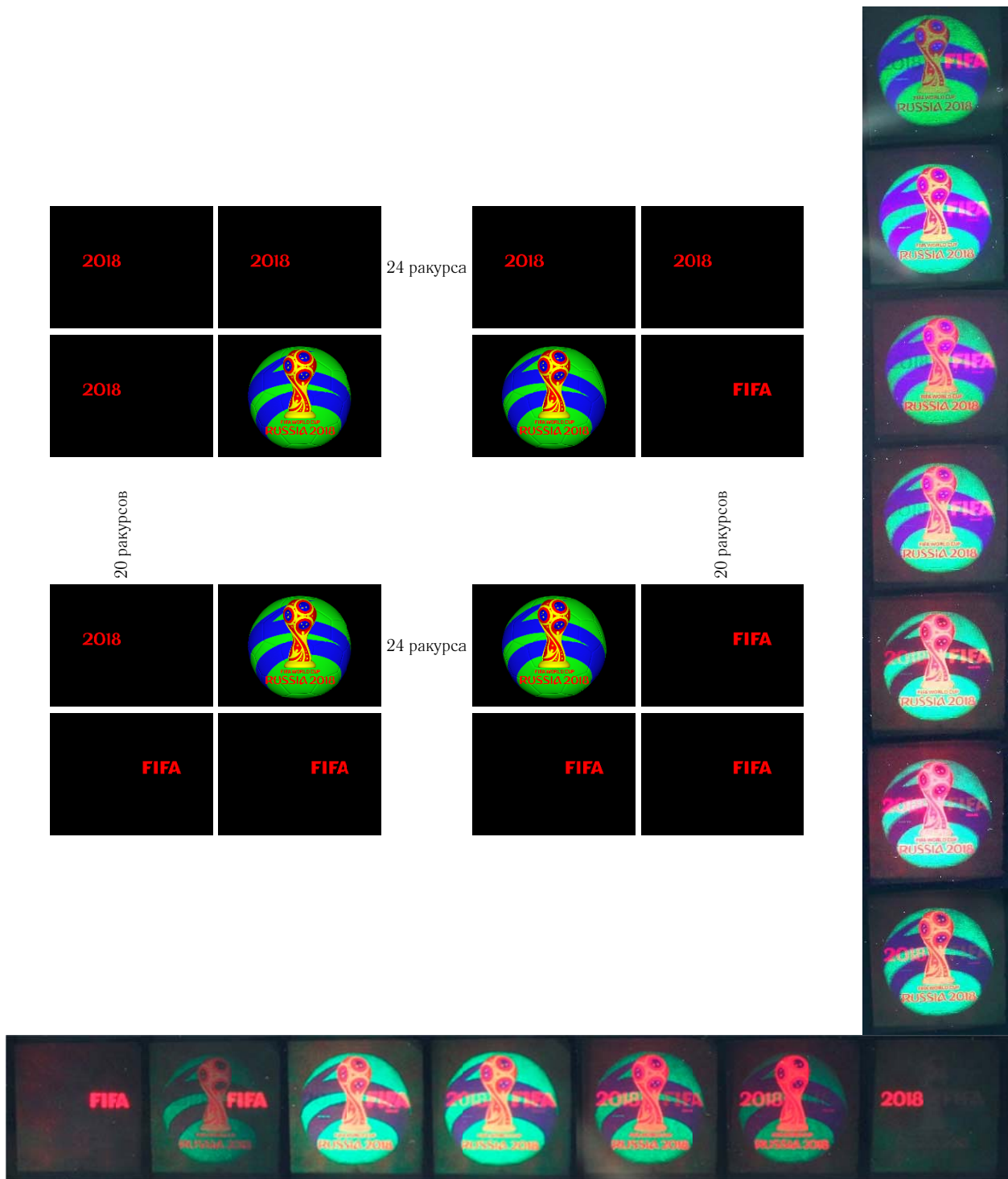


Рис. 2. Дизайн голограммной стереограммы и визуально наблюдаемое изображение, восстановленное с голограммной стереограммы при повороте голограммы вокруг горизонтальной и вертикальной осей соответственно

Воспользовавшись ранее приведенными соотношениями (2) и (3) для определения величин спектральной δ_λ и угловой δ_θ селективностей для рассматриваемого случая при значении угла Брэгга $\theta_0 = 0$ и всех других известных значениях параметров, входящих в эти соотношения, получаем $\delta_\lambda = 5 \text{ нм}$ и $\delta_\theta = \infty$. Интересующее нас значение δ_α из (5) будет $\delta_\alpha = \infty$, то есть угловая селективность будет практически отсутствовать.

Из приведенных выше расчетов можно сделать следующие выводы.

1. Визуальное восприятие голограммы с записью многоракурсного изображения в предположении точечного источника восстанавливающего излучения со сплошным спектром излучения в сагиттальном сечении с учетом рассмотрения, проведенного в разделе 1.1–1.2 для меридионального сечения с таким же источником излучения, ввиду практического равенства значений δ_λ в обоих сечениях будет таким же, как и в меридиональном сечении, то есть заметного размытия

наблюдаемого голографического изображения не будет наблюдаться, а цветовой тон изображения будет восприниматься как монохроматический.

2. Возможность наблюдения других ракурсов изображения в сагиттальном сечении при фиксированном относительном положении монохроматического точечного источника восстанавливающего излучения, центра голограммы и глаза наблюдателя путем поворота голограммы относительно оси, проходящей через центр голограммы и перпендикулярной рассматриваемому сагиттальному сечению, в виду аналогичного рассмотрения для меридионального сечения, проведенного в разделе 1.3, при отсутствии в данном случае угловой селективности голограммы ($\delta_\alpha = \infty$) будет практически неограниченной.

3. Логика рассмотрения визуального эффекта при использовании для восстановления голографического изображения протяженного источника излучения в сагиттальном сечении аналогична логике рассмотрения, проведенного в разделе 1.2 для меридионального сечения. В виду этого рассмотрения при отсутствии угловой селективности голограммы ($\delta_\alpha = \infty$) и при неограниченных размерах источника в сагиттальном сечении в области зрачка глаза наблюдателя будет иметь место

наложение всех записанных апертур ракурсов и, соответственно, максимальное размытие наблюдаемого многоракурсного изображения.

2. Практические результаты

Исходя из расчетов, приведенных в данной статье, были разработаны дизайны голограмм как для визуального наблюдения 3D изображений, восстановленных с цветных голограммных стереограмм, так и некоторые защитные элементы такие как флип-флоп эффекты по цвету и изображению. На табл. 1 представлены визуально наблюдаемые защитные эффекты в виде флип-флоп эффектов по цвету и изображению. На рис. 2 представлен дизайн цветной голограммной стереограммы и восстановленное с голограммной стереограммы изображение с горизонтальным и вертикальным флип-флоп эффектами.

Заключение

В статье показаны математические расчеты, описывающие влияния спектральной и угловой селективностей объемной цветной защитной голограммной стереограммы на процесс восстановления 3D изображений (степень размытия изображения H1-голограммы). Показано, что получение защитных элементов, таких как флип-флоп эффект, для данного типа голограмм, имеет более выраженный эффект в вертикальной плоскости, чем в горизонтальной.

Список источников

- [1] **Lushnikov, D. S.** Experimental study of the method of recording color volume security holograms on different photosensitive materials on the base of the diffuser with a narrow indicatrix of laser radiation / D. S. Lushnikov, A. Y. Zherdev, S. B. Odinokov, V. V. Markin, A. V. Smirnov // SPIE Conference Proceeding, 2016. — Vol. 10022. — P. 100221S.
- [2] **Lushnikov, D. S.** Multicolor reflection holograms with multi-angle images / D. S. Lushnikov, V. V. Markin, A. Y. Zherdev, S. B. Odinokov, A. V. Smirnov // XI International Conference HOLOEXPO 2014 Conference Proceeding, 2014. — P. 16.
- [3] **Кольер, Р.** Оптическая голография / Л. Беркхарт, Л. Лин // Пер. с англ. под ред. Ю. И. Островского. — М.: Мир, 1973.

The effect of the spectral and angular selectivities of three-dimensional color security holographic stereograms on the process of the reconstruction of 3D images

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

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

² Research and Production Company "Krypten", Dubna, Russia

The article presents a two-stage scheme for obtaining volume color security holographic stereograms. These holograms are digital holograms. The H1 hologram is recorded at the first stage. The final holographic stereogram is recorded at the second stage. The image of the H1 hologram is reconstructed in the plane of pupils of the observer's eyes, when 3D images are reconstructed from holographic stereograms. The quality of the 3D images reconstructed from hologram stereograms directly depends on the degree of blurring of the H1 image — the hologram. The article shows mathematical calculations describing the effects of the spectral and angular selectivities of a three-dimensional color security holographic stereogram on the process of reconstructing 3D images (the degree of blurring of the H1 image-hologram). It is shown, that the quality of security elements, such as the flip-flop effect, for this type of hologram, has a more pronounced effect in the vertical plane than in the horizontal plane. This is due to the large influence of the spectral and angular selectivities in the vertical plane, than in the horizontal one when reconstructing the images. Photos of images, reconstructed from a three-dimensional color security holographic stereogram, are also presented in the article. These photos confirm the correctness of the presented calculations.

Keywords: security hologram, holographic stereogram, 3D image.