

УДК 778.38; 535.42

ФОРМИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ И БИНОКУЛЯРНЫХ ОБЪЁМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗАЩИТНЫХ ГОЛОГРАММАХ С НУЛЕВЫМ ПОРЯДКОМ ДИФРАКЦИИ

© С. Б. Одинокоев¹, А. Ф. Смык², А. В. Шурыгин^{1,2}

¹Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5

²Общество с ограниченной ответственностью «Джеймс Ривер Бранч»,
123458, Москва, ул. Твардовского, 8
E-mail: a.v.shurigin@yandex.ru

Рассмотрены варианты реализации одного из видов голограмм нулевого порядка — трекограммы для формирования защитных признаков для неэкспертной проверки их подлинности. Объёмное изображение в трекограммах формируется бликами на стенках тороидальных поверхностей-треков, представляющих собой рельефные полосы на регистрирующем материале. Вариациями формы треков, их протяжённости и количества участков различных треков в одной точке изображения можно получить защитные признаки, удобные для неэкспертной идентификации голограмм. Размеры и глубины треков совместимы с обычной технологией тиснёных голограмм. Приведены фотографии голограмм, формирующих изображения в белом свете.

Ключевые слова: защитные голограммы, динамические изображения, трекограммы.

DOI: 10.15372/AUT20200205

Введение. Рельефно-фазовые голограммы широко применяются в основном в настоящее время для защиты документов и продуктов от фальсификации благодаря их высокой технологичности и дешевизне в массовом производстве. Хорошо развит набор защитных признаков, по которым производится проверка подлинности этих голограмм. Существуют защитные элементы как для экспертной идентификации, так и рассчитанные на потребителя, не знакомого подробно с их свойствами и полагающегося больше на общее впечатление от голограммы. В этом случае для проверки подлинности голограммы исключается применение приборов и вспомогательных средств [1], таких как поляризаторы, лазерные указки, лупы или декодирующие пластинки, т. е. потребителю приходится полагаться исключительно на визуальное впечатление. И здесь большое значение имеет динамика в изображении — изменение формы и положения изображения с наклоном или поворотом голограммы, а также его объём и яркость.

Последние два свойства труднореализуемы при использовании рельефно-фазовых голограмм, формирующих изображение в первом или минус первом порядке дифракции. Так, глубина объекта при типичных источниках освещения ограничена несколькими миллиметрами, а дифракционная эффективность не превышает 40 % [2]. На практике это означает, что для наблюдения чёткого изображения нужны яркие источники с малым угловым размером. При освещении протяжённым источником голограмма восстанавливает множество изображений от различных участков источника, они накладываются друг на друга, уничтожая целостность образа. Отрицательный эффект тем заметнее, чем глубже изображение или чем больше оно вынесено над плоскостью голограммы. Кроме того, в таких голограммах, как правило, отсутствует вертикальный параллакс [3], иначе ухудшается восприятие объёма.

Цель данной работы — существенно улучшить яркость изображения, его воспринимаемый объём и динамику при применении рельефно-фазовых голограмм. Для этого пред-

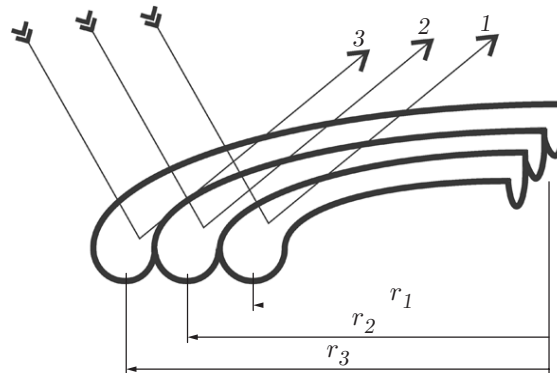


Рис. 1. Схема формирования изображения в трекограмме

лагается использовать голограммы, формирующие изображение в нулевом порядке. Такой подход, помимо повышения дифракционной эффективности, позволит расширить возможности синтеза защитных признаков, полезных с точки зрения их идентификации обычным потребителем, что способствует повышению результативности реализации защитных голограмм.

Трекограммы. Изображение объекта в трекограммах формируется [4] поточечно как набор бликов, т. е. единичных изображений освещающего источника в нулевом порядке. Они формируются при отражении от зеркальных стенок канавки, представляющей собой половину открытого тора (рис. 1).

Каждой точке объекта соответствует трек в форме замкнутой окружности, а воспринимаемая глубина точки определяется радиусом этой окружности. При наклоне трекограммы блик перемещается по внутренней поверхности тора вдоль всей окружности. Соответственно блик виден со всех сторон: слева и справа, сверху и снизу от нормали к плоскости голограммы. Если профиль трека симметричен, отражения от противоположных стенок формируют пару бликов, один из которых кажется заглублённым, а второй — выступающим из плоскости. Концентрические окружности дают линию из отдельных пар бликов. При наклоне трекограммы тороид большего радиуса r_3 меняет направление падающего на голограмму освещающего луча несколько слабее, чем трек r_2 , и ещё слабее, чем трек r_1 . В результате меняются линейное расстояние между наблюдаемыми бликами по-разному для правого и левого глаза и их относительная скорость. Это и формирует объёмное «каркасное» изображение.

Ширина канавок обычно лежит в диапазоне 5–100 мкм, а радиусы — от десятых долей миллиметра до десятков миллиметров в зависимости от размера и глубины изображения. Размер точки в изображении объекта равен или несколько меньше ширины трека и зависит от углового размера освещающего источника и параметров тороидального зеркала. Например, для световой панели размером 250 мм на высоте 2,8 м её угловой размер составит около 5° , а для канавки со сферическим профилем шириной 10 мкм и глубиной 0,5 мкм $23,6^\circ$. Тогда источник света будет формировать яркое пятно для наблюдателя от $\approx 21\%$ ширины тора.

Человек воспринимает объект объёмным двумя основными способами [5]: с помощью бинокулярного зрения и кинематического восприятия. Бинокулярный механизм формирования впечатления объёма предполагает, что каждый глаз видит своё изображение и на этих изображениях имеются точки с окрестностями сходной фактуры, совмещение которых требует сведения лучей зрения под разными углами: чем меньше угол, тем дальше кажется точка:

$$L = 0,5B \operatorname{tg}(U),$$

где L — удаление, B — бинокулярная база, $2U$ — угол сведения глаз.

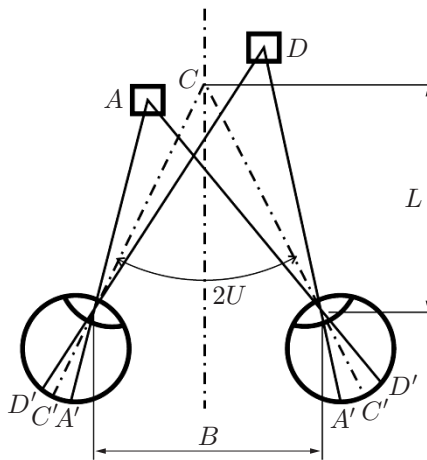


Рис. 2. Схема бинокулярного зрения

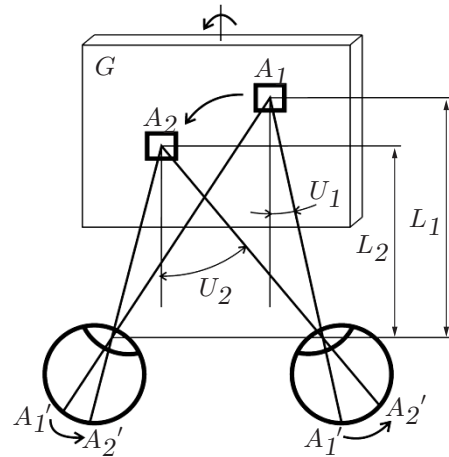


Рис. 3. Кинематическое восприятие объёма

На рис. 2 представлена схема бинокулярного восприятия объёма. Более близкие объекты требуют большего сведения оптических осей глаз (большого угла конвергенции). Человеческий мозг трансформирует угол сведения лучей во впечатление глубины расположения точки. Так происходит при поочерёдном наблюдении точек A и D объекта. Если глаза сфокусированы на некоторую среднюю точку объекта C , то восприятие объекта объёмным определяется величинами отрезков $A'D'$ в правом и левом глазу и их положением относительно оси каждого глаза. При этом важно, чтобы участки объекта, видимые разными глазами, воспринимались как один объект, т. е. у них должна быть сходная структура. Различия в изображениях, видимых правым и левым глазом, не должны разрушать единство восприятия объекта.

Условие подобия изображений выполняется в трекограммах автоматически за счёт схожести бликов, попадающих в правый и левый глаз, и их небольшого смещения на поверхности трека при наклонах.

При кинематическом восприятии объёма (рис. 3) части изображения при наклоне голограммы G по отношению к наблюдателю перемещаются по сетчатке с разными коллинеарными скоростями в одном направлении, и чем быстрее движется фрагмент, тем ближе он воспринимается:

$$L_1/L_2 = \operatorname{tg} U_2 / \operatorname{tg} U_1,$$

где L_1, L_2 — удаления фрагментов, U_1, U_2 — их угловые перемещения.

В трекограммах скорость перемещения блика (т. е. изображения источника подсветки в нулевом порядке отражения от тороидальной поверхности зеркала трека) зависит от радиуса трека. Чем меньше радиус, тем выше скорость блика и ближе к поверхности он кажется.

При совмещении обоих способов, а именно это имеет место в трекограммах, впечатление объёма усиливается. Помимо бинокулярного и кинематического восприятия объёма существуют и другие механизмы [5]. Так, для объектов известных размеров возможна оценка глубины сравнением угловых величин изображений или, если один объект частично закрывает другой, он кажется ближе. Ещё один известный факт — более светлые участки поверхности кажутся выпуклыми, а тёмные — более глубокими.

Использование этих дополнительных механизмов восприятия объёма связано с дизайном, и здесь могут открываться новые возможности трекограмм в части формирования запоминаемых защитных признаков, например: создание парадоксальных изображений,

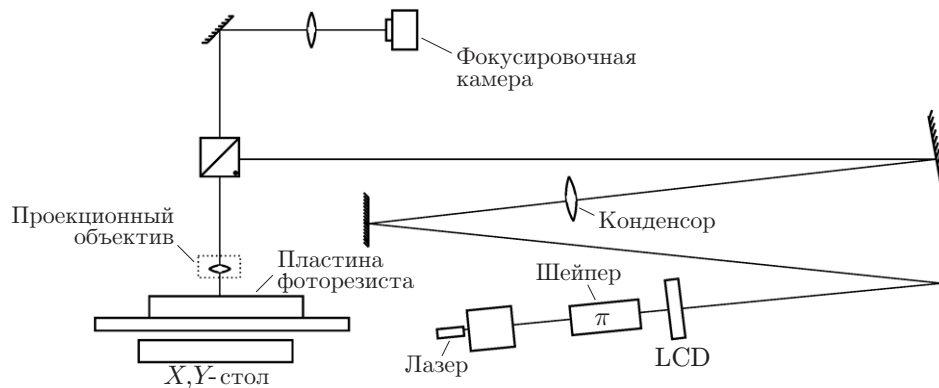


Рис. 4. Схема проекционной системы dot-matrix для экспонирования трекограмм

когда бинокулярное и кинематическое восприятие даёт одно впечатление объёма, а дополнительные механизмы — противоположное.

Динамические и объёмные изображения в трекограммах. Первые трекограммы изготавливались механически [6] с помощью циркуля, резца или циркулярной фрезы, вследствие этого они могли состоять только из замкнутых круговых треков. Соответственно изображения были ограничены каркасными объёмными структурами с равным выносом по разные стороны от плоскости голограммы. Применение проекционных систем dot-matrix [7] позволяет значительно расширить изобразительные возможности трекограмм за счёт того, что форма и профиль треков, плотность их расположения на плоскости, организация приоритетов в пересечениях могут быть произвольными и не зависеть от инструмента, как это было в механических системах.

В такой проекционной системе (рис. 4) заранее рассчитанная трекограмма выводится по частям в виде полутоновых изображений на пространственный жидкокристаллический (ЖК) модулятор и при лазерной подсветке (405 нм, 100 мВт) проецируется с уменьшением $\Gamma = 80-150\times$ на регистрирующую среду (фоторезист S1813 на стеклянной пластине). С увеличением параметра Γ повышаются требования к точности расположения проекционного объектива, для их обеспечения используется канал с фокусирующей камерой. С помощью него можно выдерживать рабочий отрезок с погрешностью порядка 0,2 мкм. После экспонирования одного участка пластинка с регистрирующей средой смещается на шаг, равный размеру проекции кадра, и происходит экспонирование следующего участка. Размер трекограммы ограничен только диапазоном перемещений по осям X и Y и размером пластины фоторезиста. В использованной системе максимальный размер трекограммы равен 120×120 мм. Скорость записи составляет обычно от 2 до 30 кадр/с с учётом времени перемещения стола в зависимости от режима записи. Пластина фоторезиста проявляется затем полуторапроцентным щелочным проявителем. Для точного воспроизведения профиля трека режимы проявления нуждаются в тщательном подборе из-за малой фотографической широты резиста. Эту же цель преследует равномерное освещение ЖК-модулятора, для достижения чего применяется амплитудно-фазовый корректор пучка (π -шейпер), преобразующий пучок лазера с гауссовым распределением в однородный [8].

Таким образом формируется система треков заданного профиля, нужной конфигурации и произвольной ширины. Глубину треков выдержать довольно сложно из-за чувствительности метода к режимам экспонирования и проявления резиста [9]. Обычно их подбирают так, чтобы получить максимальную глубину профиля и, следовательно, сделать минимальную площадь участков без рельефа, и максимальный угол обзора. Глубина рельефа, однако, ограничена технологическими факторами и для треков шириной 10 мкм редко превышает 0,5–2 мкм. Треки с такими параметрами хорошо воспроизводятся на обычных голографических прокаточных машинах, более глубокие требуют ис-

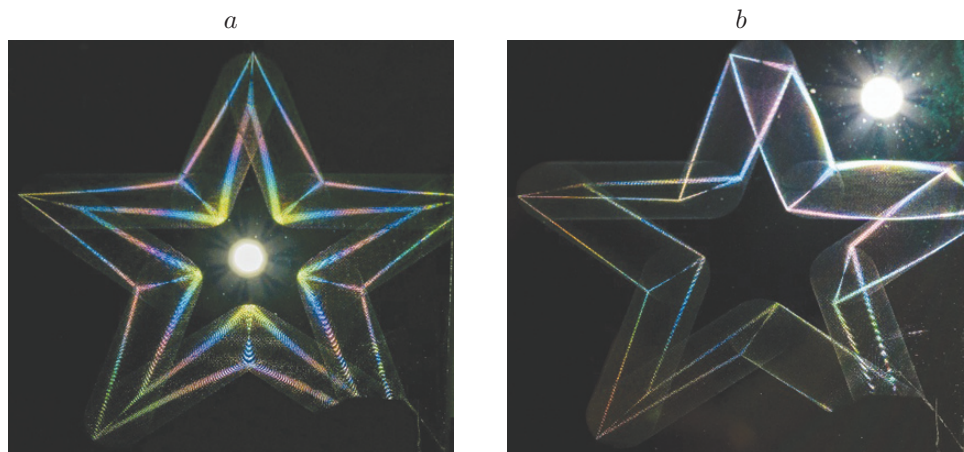


Рис. 5. Трекограмма с плавно меняющимся изображением: *a* — два подобных изображения: одно над плоскостью трекограммы, другое под ней; *b* — промежуточное положение; изображения равны по величине

пользования УФ-эмбосеров. При применении обычных прокаточных машин термическая релаксация плёнок, на которые переносится трекограмма, сильно искажает рельеф канавок, но влияние этих искажений малозаметно. При использовании прокаточных машин с УФ-отверждением и малой усадкой фотополимера есть смысл задуматься об асимметричных профилях треков и защитных признаках, которые можно при этом получить [10]. Возможности формирования динамических трекограммных изображений в этом случае расширяются. Например, можно получить изображение, попеременно появляющееся то в глубине, то на переднем плане при наклоне голограммы к источнику света, или изображение, поднимающееся из глубины и при этом несколько меняющееся в размерах или форме. Впрочем, способы формирования динамических и бинокулярных объёмных изображений, изложенные далее, применимы и к асимметричным профилям треков.

Для формирования динамических и объёмных изображений применимы три разных подхода:

1. Плавно меняющиеся изображения. Треки представляют собой замкнутые плавные кривые, не окружности, а, например, циклоиды. В этом случае блики перемещаются по замкнутой кривой и видны два плавно меняющихся, но в целом подобных изображения. Рис. 5 иллюстрирует два крайних кадра из последовательности. Видны два изображения: одно над плоскостью трекограммы, другое в глубине.

При изменении угла наклона трекограммы к освещающему пучку масштаб обоих изображений изменяется. Одно из них увеличивается в 1,5 раза, другое уменьшается, и в определённый момент они меняются местами. Вынесенное вперёд изображение переходит на задний план, а заглублённое выходит на передний. Защитный признак такого рода хорошо запоминается неосведомлённым потребителем и опознаётся с высокой достоверностью.

2. Переключающиеся изображения. Если делать треки ломаными, состоящими из участков с разными азимутами дуг в точках излома трека, то можно получить эффект переключения изображений и произвольную динамику изображения. При переходе через точку излома блик резко меняет кажущуюся глубину, а изображение в целом становится другим. Кадр участка такой трекограммы представлен на рис. 6, *a*.

Способ пригоден для построения трансформирующихся друг в друга сравнительно простых геометрических фигур (рис. 7). Если фигуры близки по количеству вершин, то таким образом можно получить эффект вращения объёмной структуры или переключения между несколькими структурами. Переключение происходит в момент перехода блика через точку излома.

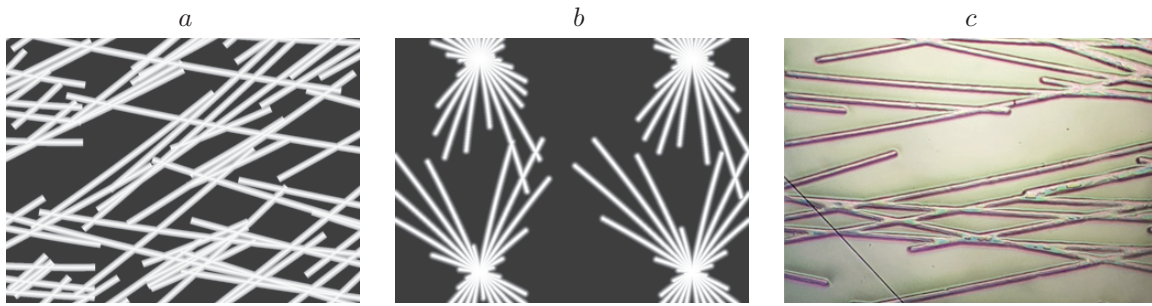


Рис. 6. Проецируемые кадры трекограммы: *a* — переключающиеся изображения $[-2\text{mm}]$, *b* — текстурированное изображение, *c* — фотокадр трекограммы

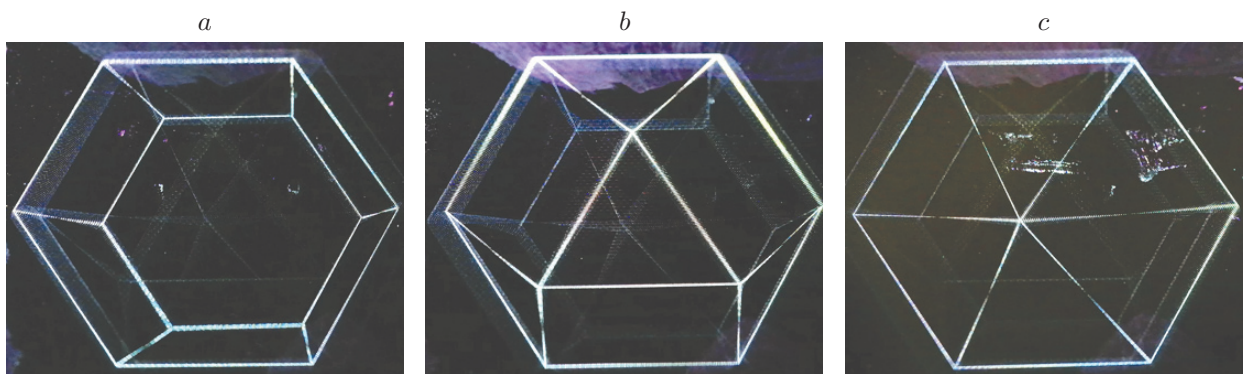


Рис. 7. Трекограмма с переключением трёх изображений: *a* — левый ракурс, *b* — средний ракурс, *c* — правый ракурс

На рис. 7 представлены три ракурса одной трекограммы с переключающимися при её наклоне изображениями. Фигура на переднем плане превращается из шестиугольника сначала в треугольник, а затем в точку. Зрительно это воспринимается как трансформация трёхмерного каркасного объекта.

3. Текстурированные изображения. В классических и динамических трекограммах, рассмотренных выше, изображения выглядят каркасными, как бы состоящими из ярких тонких стержней. Однако свобода оперирования конфигурацией треков позволяет создавать и изображения текстурированных объектов с равномерной или текстурной заливкой поверхности. Точку объекта в этом случае представляют как набор некоторого количества ракурсов, каждому из которых соответствует определённая дуга, т. е. в каждой точке объ-

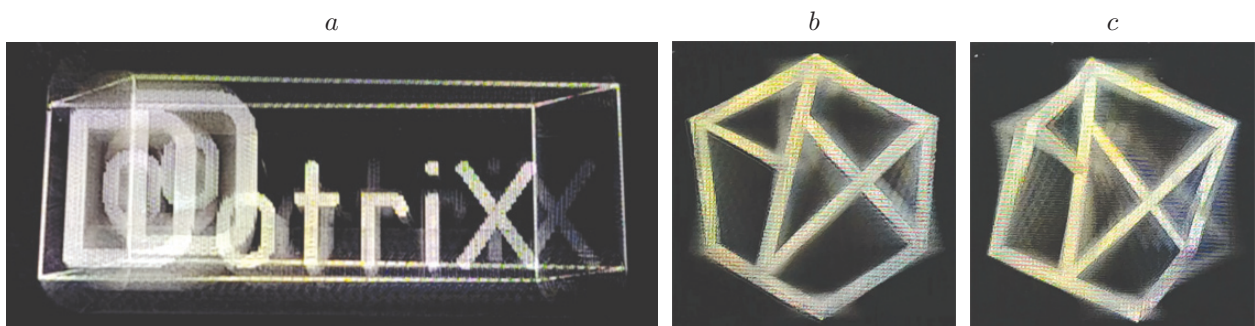


Рис. 8. Трекограммы с объёмными изображениями: *a* — голограмма в среднем положении, когда все буквы появились в надписи, *b* — голограмма наклонена влево от источника света, *c* — голограмма наклонена вправо от источника света

екта размещается пучок коротких дуг (см. рис. 6, *b*), длины которых определяют фактуру поверхности, а радиус кривизны — кажущуюся глубину. Дальнейшее развитие подхода связано с получением переключающихся текстурированных изображений, содержащих сплошные яркие области (рис. 8).

Например, на рис. 8, *a* текстурированные буквы в надписи при наклоне голограммы появляются поочередно. На рис. 8, *b, c* приведено переключающееся текстурированное изображение. Интересно, что метод применим и к парадоксальным объектам, характерным для оптических иллюзий, поскольку переменные ракурсы допускают двойное восприятие объёмного объекта. Так, на рис. 8, *b* отрезок ребра из левой верхней вершины куба переходит визуально в плоскость грани на рис. 8, *c*, что вызывает противоречивое восприятие объекта.

Заключение. Предложены варианты исполнения изменяющихся и полутоновых изображений с применением трекограмм, предназначенные для неэкспертного анализа подлинности защитных голограмм, основанные на легко запоминаемых и опознаваемых оптических эффектах.

В трекограммах воспринимаемая глубина объекта не зависит от протяжённости источника освещения, в отличие от размытия изображения голограмм, обусловленного формированием изображения в определённых дифракционных порядках. Поэтому трекограммы менее требовательны к условиям освещения, а также имеют большую яркость.

Трекограммы совместимы с материалами и технологией обычных радужных тиснёных голограмм и могут применяться в составе одного защитного знака.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Одинокоев С. Б.** Методы и оптикоэлектронные приборы для автоматического контроля подлинности защитных голограмм. М.: Техносфера, 2013. 176 с.
2. **Апрель Ж., Арсено А., Баласубрамания Н.** Оптическая голография: В 2 тт. М.: Мир, 1982.
3. **Benton S. A., Vove V. M.** Holographic Imaging. Hoboken: Wiley-Interscience, 2008. 261 p.
4. **Коганов А. В.** Формирование стереообраза на фрактализованной поверхности (трекограммы) // Вопросы кибернетики. Распознавание видеографической информации / Под ред. В. Б. Бетелина. М.: РАН, 1999. С. 110–123.
5. **Грегг Дж. Р.** Опыты со зрением в школе и дома. М.: Мир, 1970. 199 с.
6. **Власов Н. Г., Колейчук В. Ф.** Штриховая стереография // Журнал научной и прикладной фотографии. 1997. 42, № 1. С. 68–71.
7. **Смык А. Ф., Шурыгин А. В.** Асимметричные профили в поверхностно-рельефных голограммах // Мир техники кино. 2018. 1, № 12. С. 23–30.
8. **Laskin A., Juzumas V., Urniežius A. et al.** Building beam shaping optics for micromachining // Proc. SPIE. 2015. 9346. 934615.
9. **Кирьянов В. П., Никитин В. Г.** Моделирование процесса формирования отвесных участков кусочно-непрерывного профиля при одностадийной технологии записи ДОЭ наклонными лазерными пучками // Автометрия. 2017. 53, № 6. С. 15–22.
10. **Одинокоев С. Б., Бетин А. Ю., Бобринев В. И. и др.** Методы и устройства оптико-голографических систем архивной памяти. М.: Техносфера, 2018. 234 с.

Поступила в редакцию 22.11.2019

После доработки 17.12.2019

Принята к публикации 17.12.2019