

## МЕТОД И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОДНОЭТАПНОЙ ЦИФРОВОЙ ЗАПИСИ ЦВЕТНЫХ ПОЛНОПАРАЛЛАКСНЫХ ГОЛОГРАММНЫХ СТЕРЕОГРАММ

А.Ю. Жердев<sup>1</sup>

Д.С. Лушников<sup>1</sup>

В.В. Маркин<sup>1</sup>

С.Б. Одинок<sup>1</sup>

А.В. Смирнов<sup>2</sup>

dmlu41@yandex.ru

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> АО «НПО «Криптен», Дубна, Московская обл., Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрена аппаратура записи голограммных стереограмм. Реализован метод одноэтапной цифровой записи цветных полнопараллаксных голограммных стереограмм с формированием в плоскости голограммы безрастрового изображения. Аппаратура реализована в варианте записи защитных голографических стереограмм

### Ключевые слова

*Защитные голограммы, цветные голограммы, мультиплексные голограммы, голограммные стереограммы*

Поступила в редакцию 27.06.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

Голограммная стереограмма (ГС) представляет собой голограмму, формирующую при восстановлении массив наложенных двухмерных изображений объекта, каждое из которых является изображением, наблюдаемым с определенного направления, или ракурса. При рассмотрении такого многоракурсного 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 происходит 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.

Современные высокопроизводительные системы записи ГС являются цифровыми, использующими в предметном пучке ЖК-дисплей с компьютерным последовательным вводом записываемых изображений. Одноэтапные растровые системы — широко распространенные голографические системы записи стереограмм. В растровых голографических системах, называемых иногда голографическими принтерами, голограмма и, соответственно, изображение объекта формируются в виде одномерного растра, при записи однопараллаксных стереограмм [1, 2], или двухмерного растра, при записи полнопараллаксных голограмм [3]. В таких системах каждый элемент растра на голограмме обеспечивает восстановление всего набора ракурсов для записываемого элемента изображения объекта. Запись одного такого элемента представляет собой регистрацию в фоточувствительной среде поля интерференции опорного и предметного пучков, при этом предметный пучок должен содержать в виде пространственно

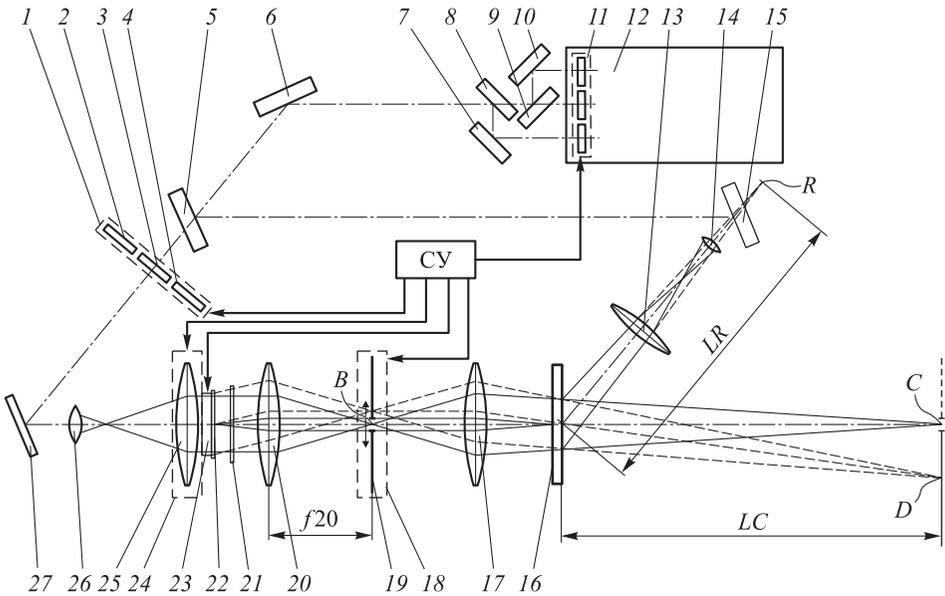
разделенных субпучков информацию обо всех ракурсах регистрируемого элемента изображения. Следовательно, выводимое на ЖК-дисплей в предметном пучке изображение не может быть просто изображением объекта в одном определенном ракурсе, а является сложным, компьютерно-синтезированным по определенному алгоритму изображением. 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 определяется 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 такого размера с помощью установленной перед регистрирующей средой диафрагмой или щелью проблематично и достигается усложнением оптической схемы аппаратуры. Кроме того, необходимо учитывать ухудшение качества восстановленного изображения вследствие рассеяния излучения на растровой структуре голограммы, а также то, что растровый характер изображения не позволяет включать в изображения мелкоструктурные защитные элементы, например, микротекстовые 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 осуществляется либо мультиплексная запись элемента растра при различных длинах волн [3, 4], либо параллельная запись элементов растра при различных длинах волн [5]. Вариант аппаратуры с мультиплексной записью, требующий объединения пучков трех длин волн в одном канале, сопровождается повышением требований к оптической системе и ввиду этого ее усложнением, а также падением дифракционной эффективности ГС вследствие мультиплексирования. Вариант аппаратуры с параллельной записью очень громоздкий.

Перечисленные выше недостатки растровых систем привели к созданию принципиально отличающейся системы записи ГС, имеющей преимущества при записи защитных стереограмм, когда нет необходимости в получении голограмм больших размеров, но требуется высокое качество изображения для обеспечения возможности включения в него мелкоструктурных защитных элементов. Оптическая схема разработанной системы записи ГС, реализующей одноэтапную цифровую запись цветных полнопараллаксных голограмм с формированием в плоскости голограммы безрастрового изображения, приведена на рисунке (в горизонтальном сечении на виде сверху). Представлена система в варианте записи отражающих ГС.

Излучение (*Geola RGB Alfa A1*), дающее три отдельных пучка с длинами волн 440, 532 и 660 нм, с помощью системы дихроичных зеркал 7–10 объединяется в единый пучок. В лазер входит блок затворов 11, открываемых на время экспозиции от общей системы управления (СУ), а также полуволновые пла-



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

СУ — система управления; 1 — устройство смещения; 2-4 — полуволновые пластинки; 5 — полупрозрачное зеркало; 6, 27 — зеркало; 7-10 — дихроичные зеркала; 11 — блок затворов; 12 — твердотельный импульсный лазер; 13, 14 — линзы; 15 — опорное зеркало; 16 — плоскость регистрирующей среды; 17, 20 — объективы; 18, 24 — механизм перемещения; 19 — диафрагма; 21 — анализатор; 22 — диффузор; 23 — жидкокристаллический пространственно-временной модулятор света; 25, 26 — телескопическая система линз

стинки в каждом пучке, обеспечивающие необходимую ориентацию плоскости поляризации. В этой системе устанавливается вертикальная плоскость колебаний электрического вектора. После отражения зеркалом 6 объединенный пучок излучения с помощью полупрозрачного зеркала 5 делится на два пучка: предметный и опорный.

При экспонировании на определенной длине волны, которое на каждой длине волны осуществляется последовательно, в ход предметного пучка устанавливаются соответствующие полуволновые пластинки 2, 3 или 4, переводящие колебание электрического вектора в горизонтальную плоскость. Смена пластинок выполняется устройством смещения 1, управляемым от СУ. После отражения предметного пучка от зеркала 27 телескопическая система линз 25 и 26 формирует коллимированный пучок с размерами, необходимыми для равномерной засветки рабочего окна жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света (ПВМС) 23. Основная функциональная часть оптической системы предметного пучка, включающая в себя элементы 16–25, обеспечивает последовательный ввод в ПВМС от СУ регистрируемых ракурсов изображений и проекционный перенос с помощью объективов 20 и 17 этих изображений в плоскость регистрирующей среды 16. За ПВМС помещается

диффузор 22 и далее по ходу лучей анализатор 21. Анализатор пропускает излучение с вертикальной ориентацией электрического вектора и обеспечивает максимальный контраст наблюдаемого за ПВМС изображения. В задней фокальной плоскости объектива 20 установлена диафрагма 19. 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 19 вырезает центральную информативную часть спектра и играет роль пространственного фильтра.

Пучок излучения за объективом 17, формирующим изображение на регистрирующей среде, является пучком, сходящимся в некоторой точке на определенном расстоянии за регистрирующей средой. Это расстояние соответствует расстоянию, с которого наблюдается изображение на голограмме при его восстановлении. В рассматриваемой реализации аппаратуры это расстояние составляет 400 мм. Сплошными линиями на рисунке показан ход лучей в предметном пучке при записи центрального (осевого) ракурса, сходящихся за регистрирующей средой в точке *C* на оси системы. Центр пучка, выделяемого диафрагмой 19 (точка *B*), и центр пучка, сходящегося за регистрирующей средой 17 (точка *C*), являются оптически сопряженными. Использование диффузора 22 обеспечивает размытие центрального максимума ПЧС в пределах апертуры диафрагмы 19 и, тем самым, выравнивает распределение интенсивности излучения в области схождения предметного пучка за регистрирующей средой.

Смена изображений, вводимых в ПВМС, сопровождается поперечным смещением линзы 25 с помощью механизма перемещения 24. Это обеспечивает изменение направления пучка излучения, падающего на жидкокристаллический ПВМС и объектив 20, и, соответственно, изменение направления пучка излучения, формирующего изображение на регистрирующей среде за объективом 17. В связи со смещением ПЧС в фокальной плоскости объектива 20 происходит перемещение фильтрующей диафрагмы 19 с помощью механизма перемещения 18. При этом в поперечном направлении смещается и точка схождения предметного пучка за регистрирующей средой (из точки *C* в точку *D*). Ход лучей, формирующих изображение в плоскости регистрирующей среды 24 при вводе в ПВМС произвольного ракурса изображения объекта и при соответствующем смещении линзы 25, показан на рисунке штрихпунктирными линиями.

После отражения от полупрозрачного зеркала 5 лазерное излучение в ветви опорного канала зеркалом 15 отражается в направлении регистрирующей среды 24. Опорный пучок, падающий на регистрирующую среду, с помощью линз 26 и 27 формируется в гомоцентрический расходящийся пучок с центром расхождения *R*, отстоящим от регистрирующей среды на расстоянии 1 м. Это расстояние соответствует расстоянию, на котором находится восстанавливающий источник излучения при рассмотрении ГС. В приведенной реализации системы, предназначенной для записи защитных ГС, имеющих относительно небольшие размеры (порядка нескольких сантиметров) и рассматриваемых с небольшого расстояния (400 мм), восстанавливающий источник излучения также расположен на относительно неболь-

шом расстоянии от голограммы. Здесь принимаем это расстояние равным 500 мм. Угол падения опорного пучка на регистрирующую среду составляет примерно  $45^\circ$ .

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

При рассмотрении записанной ГС голограмма, восстанавливающий источник излучения и наблюдатель находятся в одной вертикальной плоскости. При этом их относительное положение должно соответствовать относительному положению регистрирующей среды, центра  $R$  гомоцентрического опорного пучка и точки  $S$  схождения предметного пучка на стадии записи ГС (на схеме расположены в плоскости изображения, см. рисунок). 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, которая соединяет глаза наблюдателя (направление, перпендикулярное плоскости изображения, см. рисунок), 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, равному произведению числа ракурсов для записываемого объекта и числа 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, такой 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.

Применительно к рассмотренной выше оптической схеме аппаратуры для записи полнопараллаксных ГС отметим, что она может быть использована и для 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 22 с широкой индикатрисой рассеяния в соответствующем направлении, совпадающем с плоскостью изображения (см. рисунок), а диафрагма 19

должна быть щелевой. Кроме того, аппаратура может быть представлена в варианте записи пропускающих ГС. Для этого часть системы опорного пучка (элементы 14 и 13), формирующая его геометрию в области регистрирующей среды, должна быть симметрично развернута в плоскости изображения оптической схемы относительно плоскости регистрирующей среды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Kihara N.* Holographic stereogram forming apparatus. Patent US 7046409 B2. Publ. 16.05.2006.
2. *Toyoda T.* Holographic stereogram printing system, holographic stereogram printing method and holographic device. Patent US 6559983. Publ. 06.05.2003.
3. *Klug M., Holzbach M., Ferdman A.* Method and apparatus for recording one-step, full-color, full-parallax, holographic stereograms. Patent US 6630088 B1. Publ. 11.12.2001.
4. *Brotherton-Ratcliffe D.* Holographic printer. Patent US 6930811. Publ. 16.08.2005.
5. *Brotherton-Ratcliffe D.* Holographic printer. Patent US 7161722. Publ. 09.01.2007.

**Жердев Александр Юрьевич** — научный сотрудник НИИ «Радиоэлектроника и лазерная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Лушников Дмитрий Сергеевич** — научный сотрудник НИИ «Радиоэлектроника и лазерная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Маркин Владимир Васильевич** — ведущий инженер НИИ «Радиоэлектроника и лазерная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Одинокоев Сергей Борисович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Смирнов Андрей Валентинович** — начальник голографической лаборатории АО «НПО «Криптен» (Российская Федерация, 141980, Московская обл., Дубна, ул. Приборостроителей, д. 2).

### Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Жердев А.Ю., Лушников Д.С., Маркин В.В., Одинокоев С.Б., Смирнов А.В. Метод и устройство для одноэтапной цифровой записи цветных полнопараллаксных голограммных стереограмм // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 1. С. 16–23. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-1-16-23

## METHOD AND EQUIPMENT FOR ONE-STAGE DIGITAL RECORDING OF COLOUR FULL-PARALLAX HOLOGRAPHIC STEREOGRAM

A.Yu. Zherdev<sup>1</sup>

D.S. Lushnikov<sup>1</sup>

dmlu41@yandex.ru

V.V. Markin<sup>1</sup>

S.B. Odinkov<sup>1</sup>

A.V. Smirnov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Research and Production Center Krypten, Dubna, Moscow Region, Russian Federation

---

### Abstract

The study tested holographic stereogram recording equipment. For that purpose, we implemented a one-step method for digital recording of full-parallax coloured holographic stereograms with the formation of a contone image in the hologram plane. The equipment is implemented in the form of recording protective holographic stereograms

### Keywords

*Protective holograms, coloured holograms, multiple-object beam holograms, holographic stereograms*

---

### REFERENCES

- [1] Kihara N. Holographic stereogram forming apparatus. Patent US 7046409 B2. Publ. 16.05.2006.
- [2] Toyoda T. Holographic stereogram printing system, holographic stereogram printing method and holographic device. Patent US 6559983. Publ. 06.05.2003.
- [3] Klug M., Holzbach M., Ferdman A. Method and apparatus for recording one-step, full-color, full-parallax, holographic stereograms. Patent US 6630088 B1. Publ. 11.12.2001.
- [4] Brotherton-Ratcliffe D. Holographic printer. Patent US 6930811. Publ. 16.08.2005.
- [5] Brotherton-Ratcliffe D. Holographic printer. Patent US 7161722. Publ. 09.01.2007.

**Zherdev A.Yu.** — researcher at the Radio-Electronics and Laser Engineering Research Institute, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Lushnikov D.S.** — researcher at the Radio-Electronics and Laser Engineering Research Institute, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

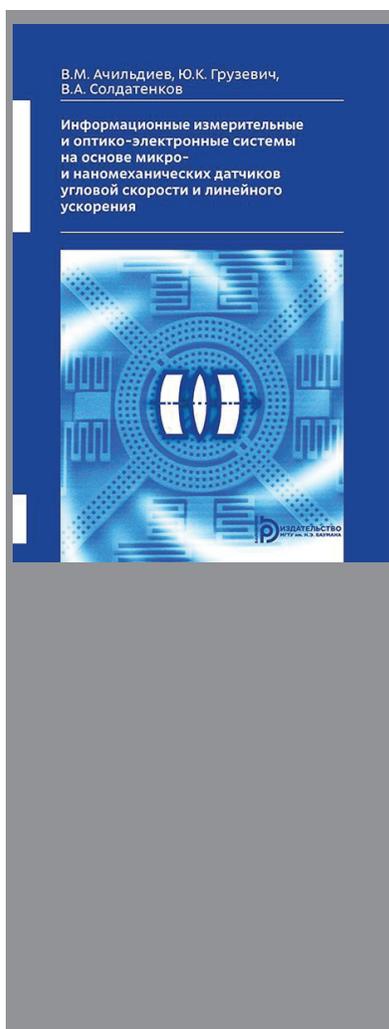
**Markin V.V.** — leading engineer at the Radio-Electronics and Laser Engineering Research Institute, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Odinkov S.B.** — Dr. Sci. (Eng.), Professor of Laser and Optoelectronic Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Smirnov A.V.** — Head of Holographic Laboratory, Research and Production Center Krypten (Priborostroiteley ul. 2, Dubna, Moscow Region, 141980 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Zherdev A.Yu., Lushnikov D.S., Markin V.V., Odinkov S.B., Smirnov A.V. Method and Equipment for One-Stage Digital Recording of Colour Full-Parallax Holographic Stereogram. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 1, pp. 16–23. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-1-16-23



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет учебное пособие авторов

**В.М. Ачильдиева, Ю.К. Грузевича,  
В.А. Солдатенкова**

**«Информационные измерительные  
и оптико-электронные системы на основе микро-  
и наномеханических датчиков угловой скорости  
и линейного ускорения»**

Рассмотрены основные физические принципы работы и особенности функционирования гироскопов различных видов. Исследованы микромеханические гироскопы и акселерометры с рамочной и консольной конструкциями чувствительного элемента с емкостными и автоэлектронными преобразователями и наноэлектромеханические измерительные преобразователи для измерения тепловых полей малой интенсивности в инфракрасной и терагерцовой областях спектра. Предложены способы изготовления и локальной инициализации вискера по переменному току после формирования механической структуры чувствительного элемента. Описан синтез регуляторов методом модального управления и идентификации коэффициентов чувствительности к температуре и напряжению питания. Приведены примеры схем построения, моделирования и испытаний систем управления и навигации летательных микроаппаратов на основе бесплатформенных инерциальных блоков, различных информационно-измерительных средств с использованием наклономеров, оптико-электронных устройств наблюдения с определением координат удаленных объектов и наשלемных систем ориентации.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
+7 (499) 263-60-45  
press@bmstu.ru  
www.baumanpress.ru