

Синтез голограмм на приёмном конце канала связи с объектом голографирования

С.А. Шойдин¹

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

Аннотация

Предложен метод синтеза голограмм, восстанавливающих 3D-изображение с использованием двух 2D-изображений, в т. ч. топографической карты поверхности 3D-объекта и фотографии текстуры его поверхности, полученных с использованием когерентного и некогерентного излучения. Метод пригоден для передачи информации о 3D-объекте по каналу связи и последующего синтеза голограмм на удалении от объекта голографирования. Он может быть применён в устройствах дополненной реальности, при создании голографических фотоаппаратов и 3D-видеокамер, в 3D-проекторах и микроскопах, устройствах с синтетизированной апертурой. Указанный метод удалённого синтеза голограмм пригоден для воспроизведения на расстоянии от объекта его голографических 3D-изображений в различных участках диапазона электромагнитного излучения. Приведены примеры восстановления 3D-изображения в ИК-части спектра. Метод пригоден также для синтеза голограмм в УФ-, ТГц- и даже радиодиапазоне.

Ключевые слова: лазер, голограмма, информационная ёмкость голограмм, дополненная реальность, голографическое телевидение.

Цитирование: Шойдин, С.А. Синтез голограмм на приёмном конце канала связи с объектом голографирования // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 4. – С. 547-551. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-694.

Citation: Shoydin SA. Synthesis of holograms received by communication channel. Computer Optics 2020; 44(4): 547-551. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-694.

Введение

В задачах хранения и обработки информации особое место занимают голографические системы и устройства, в которых производится запись, хранение и обработка изображений. Вскоре после появления первых работ Ю.Н. Денисюка [1], в которых говорится о возможности хранения полной информации об объекте, появляются работы Ван Хирдена [2] и Хилла [3], где предлагается использовать голограммы для записи и хранения больших массивов информации в двоичном виде в качестве ПЗУ для компьютеров и других вычислительных систем. В [2, 3] за основу была взята схема с записью матриц Фурье-голограмм в одной плоскости и восстановления каждой голограммой матрицы бинарных точек в другой плоскости – плоскости изображения. Расстояние между голограммами определялось допустимым перекрёстным шумом, возникающим от восстановления соседних голограмм «хвостами» восстанавливающего нужную голограмму лазерного Гауссова пучка. Далее появились работы по практической реализации записи двоичной информации на оптический носитель [4–9]. Практически во всех работах рассматривалась возможность увеличения плотности записи матриц информации, зарегистрированной в виде бинарных состояний световых сигналов (пикселей).

В простом случае с апертурным мультиплексированием и записью бинарных ячеек информационная ёмкость N достигает произведения числа записанных

голограмм N_h на количество информационных ячеек N_t в каждой и ограничивается дифракционными пределами записывающей и восстанавливающей оптических систем.

$$N = N_h \cdot N_t \approx \frac{S_t}{d^2} \cdot \frac{S_h}{D^2} = \frac{S_t}{d^2} \cdot \frac{S_h}{\lambda^2 (f^2/d^2)} = S_t \frac{S_h}{\lambda^2 f^2} = \frac{S_h}{\lambda^2} \omega^2 = S_h \cdot n. \quad (1)$$

Здесь S_t и S_h – площадь транспаранта и голограммы соответственно, d и $D = \lambda \cdot f/d$ – размеры ячейки транспаранта и одиночной голограммы, λ – длина волны записи, f – фокусное расстояние записывающего и восстанавливающего изображения объективов, $\omega \sim (S_t)^{1/2}/f$ – относительное отверстие записывающего объектива, а $n = (\omega/\lambda)^2$ – плотность записи информации.

Как известно, в этом приближении при $\omega = 1$, что соответствует хорошим оптическим системам, плотность записи бинарной информации $n = (\omega/\lambda)^2$ соответствует одному биту на площади, равной λ^2 , что для $\lambda = 0,63$ мкм соответствует $n = 2,5$ Мбит/см². Уже такая плотность информации в голограмме создаёт слишком большие информационные потоки, которые затруднительно передавать по радиоканалу. Однако реально даже на монохромных изобразительных голограммах записывается не бинарная, а полутонная информация, когда в каждой точке вместо единиц и нулей формируется массив значений фотоотклика (m). Для простейших амплитудных голограмм можно

оценить число таких значений по числу различных градаций серого тона на фотографии, исходя из соотношения $2^k = m$. Здесь k – количество бит, которым кодируется цвет, например, в принтере или графопостроителе.

В этом случае одна точка на голограмме может иметь m различных состояний и по формуле Шеннона [10] несёт ещё большее количество информации, чем в бинарном случае.

$$N = WT \cdot \log_2(1 + m), \tag{2}$$

где m – имеет смысл отношения сигнал/шум записанного на голограмму сигнала, а W – его максимальная частота, равная плотности точек на голографическом носителе. По [10] T -время передачи сигнала, а в оптике – его длина, равная размеру голограммы. Если не углубляться в подробности дискретизации передаваемого аналогового сигнала, что связано с теоремой отсчётов В.А. Котельникова, то количество записываемой на голограмме информации приближённо можно оценить как:

$$N = S_h \cdot n \cdot \log_2(1 + m). \tag{3}$$

Здесь S_h – пространственная продолжительность сигнала на голограмме, равная её площади (1), а $n = (\omega/\lambda)^2$ – максимальная двумерная пространственная частота.

Конечно, чем больше m , тем точнее передаётся изображение и тем меньше различных, в том числе и нелинейных, искажений (т.н. «духов») будет в восстановленном голограммой изображении. Однако для простоты можно ограничиться обычным полиграфическим качеством, когда k не превосходит 10. Даже в этом упрощённом случае оценки по (3) показывают, что количество информации, записанное на одной портретной голограмме размером $S_h = 297 \times 420 \text{ мм}^2$ на длине волны $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$, соответствующей $n = 2,5 \text{ Мбит/см}^2$ и отношению сигнал/шум $m = 1024$, превышает $N \approx 3 \text{ Тбит}$, что соответствует сегодняшним 346 фильмам стандарта Full Hd по 9 гигабайт каждый. Видно, что это больше, чем сумма всех доступных телеканалов вместе взятых. Хотя такие большие объёмы информации для передачи одного голографического кино удалось реализовать в рамках технологии кинематографа [11], но при телевизионной передаче они заполняют весь радиодиапазон, что заводит в тупик реализацию проектов голографического телевидения. Поэтому особенно актуальной является задача сжатия голографической записи до приемлемых объёмов без потерь и без внесения недопустимых искажений [12, 13].

**Численное моделирование
и экспериментальные результаты**

В [14] предложен способ реализации такого сжатия, основанный на изменении несущей частоты го-

лографического сигнала. Действительно, в традиционной голограмме несущей является частота интерференционных полос, на которой происходит дифракция света при восстановлении голографического изображения. Эта частота на порядки превосходит пространственные частоты, содержащиеся в голографируемом изображении, включая и частоты, описывающие структуру его поверхности, и частоты, описывающие перепады глубины на поверхности объекта. Обычное фотографическое изображение содержит все пространственные частоты, необходимые для передачи изображения, но не содержит несущей частоты, необходимой для голографической регистрации и последующего восстановления голографического изображения. Предложенный в [14] метод регистрации голографического изображения был основан на разделении информации о двумерной структуре поверхности объекта – его текстуре и форме его поверхности в третьем измерении – топографии. Реализация на первом этапе была предложена в виде двух фотографических изображений, одно из которых (рис. 1) является обычной фотографией объекта, содержащей информацию о текстуре поверхности объекта, а другое – фотографией (рис. 2) искривлённых 3D-объектом заранее сформированных и направленных на объект голографирования интерференционных полос (рис. 3а, б). Такие полосы могут быть сформированы прямой интерференцией двух плоских волн, как в классической голографии [1], методом муаровой интерферометрии [15] или проекцией заранее созданного рисунка [16].

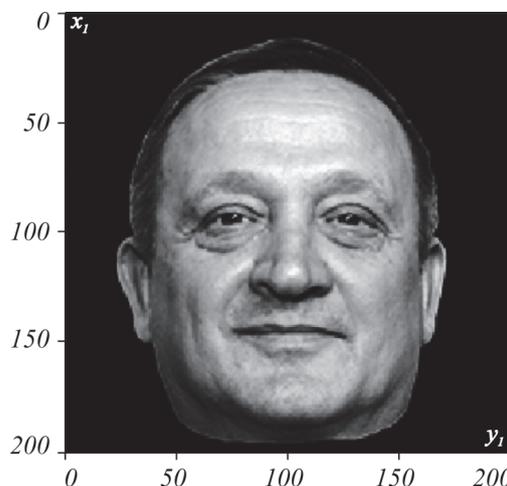


Рис. 1. Изображение одного цветового слоя объекта голографирования, освещённого белым некогерентным светом (в серых тонах)

Возможно также формировать топографическую карту поверхности любым другим способом, например, прямым лазерным 3D-сканированием [14].

Это, как и в голографической интерферометрии, даёт возможность восстанавливать информацию о третьей координате – глубине расположения точек 3D-объекта, создавать компьютерный образ формы

подстилающей поверхности, его топографической карты, иногда называемой «маска» (рис. 4).

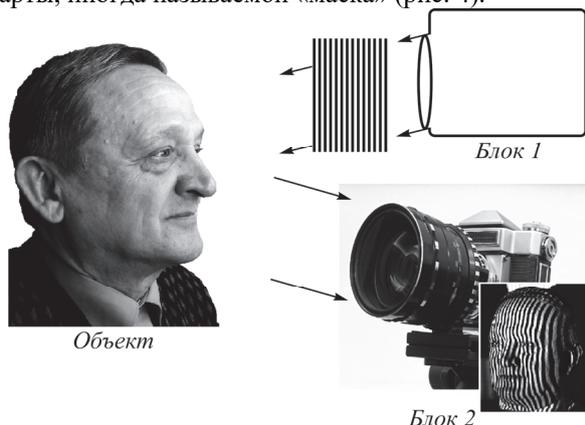


Рис. 2. Изображение одного цветового слоя объекта голографирования, освещённого белым некогерентным светом вместе со спроецированным на него вторым блоком под небольшим углом специальных интерференционных полос голограммы, но вынесенных из неё и расположенных непосредственно на объекте голографирования

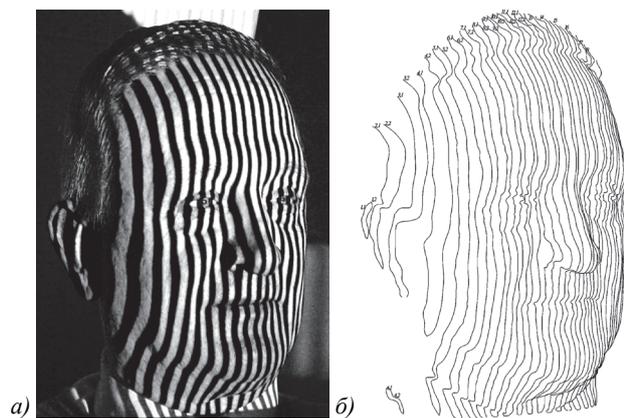


Рис. 3. Первая стадия – получение изображения объекта с полосами для топографической карты объекта (а), выделение полос для формирования топографической карты объекта (б)

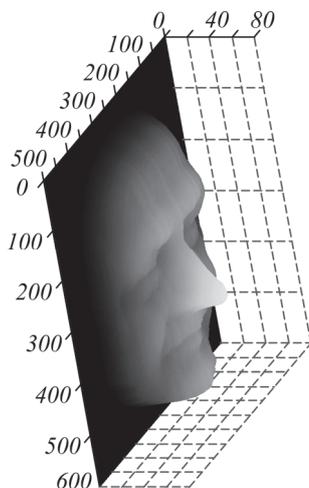


Рис. 4. Построенная топографическая карта объекта, представляющая собой 3D-маску объекта

Затем точки созданной таким образом топографической карты совмещались с точками на фотографии. Синтезированные заранее интерференционные полосы имели частоту не выше фотографического разрешения, и поэтому обе фотографии содержали информацию, сравнимую с информацией двух кадров с разрешением Full HD (рис. 1, 3б). Отличие сформированных таким образом интерференционных полос от полос, формируемых в реальной голографической схеме, заключается в отсутствии искажений, связанных с распространением сигнала в пространстве между блоками и объектом, описываемых преобразованием Френеля [16], однако из-за выбираемой нами низкой частоты интерференционных полос такие искажения пренебрежимо малы. Таким образом, информация об объёме 3D-объекта содержалась в 2D-массиве, а вся информация о 3D-объекте – в двух 2D-массивах информации стандарта Full HD.

Эти два массива информации легко передаются обычными средствами с передающего конца канала связи на приёмный, не занимая широкой полосы частот. Реально общий массив передаваемых данных не должен даже содержать двух кадров Full HD. Достаточно одного кадра Full HD с текстурой объекта и небольшой добавки информации о маске, величина этой добавки определяется требованиями к качеству передачи поверхности (маски). В простой передаче 3D-портрета стопроцентная его узнаваемость достигалась уже при передаче информации о маске в объёме около 30 КБ. Конечно, при передаче информации о подстилающей поверхности в режиме посадки летательного аппарата может потребоваться передача больших массивов для необходимой точности передачи топографии поверхности. Это в указанном методе легко достигается регулированием разрешения (частоты интерференционных полос).

По массивам информации, отображённой на рис. 1, 4, создавался компьютерный макет объекта голографирования, который использовался при расчёте амплитуды и фазы объектного пучка при моделировании классической схемы записи голограмм (рис. 5).

Синтезированная путём вычисления интерференционной картины, образованной опорным и объектным пучками, голограмма вновь получает высокую несущую пространственную частоту, дифракция на которой восстанавливает 3D-изображение объекта.

Обсуждение

Такой компьютерно-синтезированный 3D-объект пригоден для вычисления интерференционных полос голограммы, восстанавливающей 3D-изображение на любой заранее выбранной длине волны. На рис. 6 показаны 6 проекций этого 3D-объекта, взятых с произвольных сторон. Здесь текстура (рис. 1) представлена тремя слоями в технологии RGB.

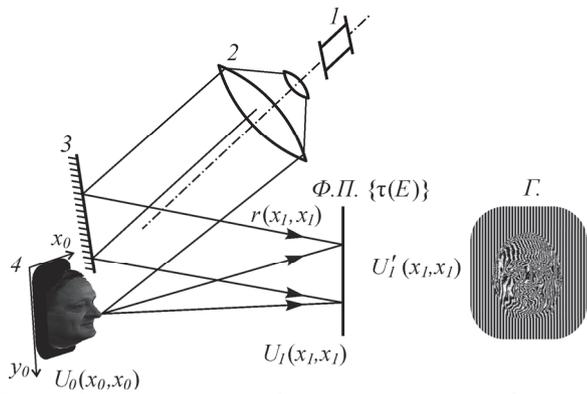


Рис. 5. Оптическая схема формирования голографической дифракционной решётки $\Gamma = \tau(x_1 y_1)$.

1 – источник когерентного излучения, 2 – коллиматор, 3 – зеркало, 4 – объект голографирования, формирующий объектный пучок $U_0(x_0, y_0)$, изменяющийся при распространении в пространстве $U_1(x_1, y_1)$ и в плоскости фотопластинки (Ф.П.), интерферирующий с опорным пучком $r(x_1, y_1)$, образуя пропускающую голограмму Γ



Рис. 6. Восстановленные виртуальной голограммой 6 проекций 3D-объекта в видимом диапазоне длин волн

На рис. 6 приведены фотографии восстановленного синтезированной голограммой 3D-изображения объекта голографирования, получившего фазу (рис. 4), зарегистрированную предложенным методом. Видны 6 проекций синтезированного виртуальной голограммой 3D-изображения. Взгляд человека на них направлен в разные стороны, как бывает, когда мы смотрим на трёхмерный объект с разных углов в трёхмерном пространстве. На исходной же фотографии (рис. 1) было зарегистрировано только изображение «анфас». Взгляд человека был направлен прямо в объектив. Любые повороты этого изображения не приводят к изменению направления взгляда, поскольку на фотографии утрачивается информация о фазе регистрируемого объектного пучка.

Трёхмерный объект, необходимый для создания голограммы, чьи проекции представлены на рис. 6, был синтезирован по двум двумерным массивам данных, один из которых – оцифрованная фотография, несущая информацию о текстуре поверхности, а вто-

рой – о топографии глубины расположения точек этой текстуры.

Следует отметить, что компьютерно синтезированную голограмму можно создавать практически на любой несущей частоте, соответствующей не только видимому диапазону, но и любому другому, например, ИК (рис. 7).

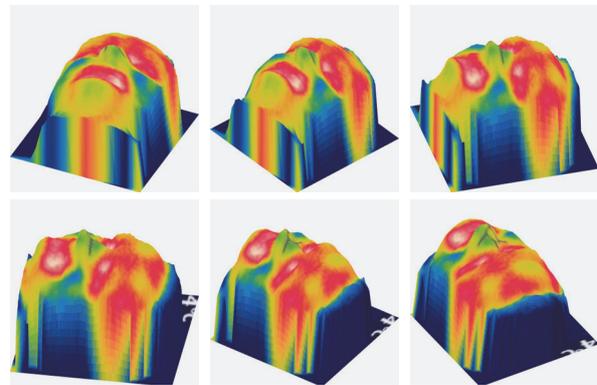


Рис. 7. Восстановленное виртуальной голограммой изображение объекта в ИК-диапазоне длин волн

Такие компьютерно синтезированные голограммы могут иметь любую несущую частоту. Их создание эквивалентно известному в радиотехнике процессу супергетеродинамирования, когда в радиопередаче не меняется огибающая, создающая модуляцию, но изменяется несущая частота [17], на которой огибающая, несущая информацию, передаётся.

Заключение

Предложенный метод сжатия голографической информации не теряет информации, необходимой для однозначного распознавания объекта, поскольку сохраняет все пространственные частоты фотографического качества, содержащиеся в изображении, но дополнительно несёт информацию об объёме с таким же разрешением, не меньше фотографического.

Особенно интересно, что предложенный метод пригоден для синтеза голографических изображений, полученных в разных диапазонах электромагнитного излучения и даже в разных типах излучения, например, электромагнитного и звукового. Возможность использования комбинации различных излучений особенно актуальна в различных задачах ИК-, УФ-, ТГц- и даже радиовидения и ультразвуковой локации, когда, например, топография подстилающей поверхности посадочной полосы получается путём её сканирования радаром, а на мониторе она соединяется с фотографическим изображением.

И, конечно, предложенный в [14] метод регистрации параллельно двух 2D-изображений пригоден для их передачи по радиоканалу с последующим синтезом 3D-изображений без их недопустимых искажений и одновременно без чрезмерной перегрузки радиоканала. Это позволяет с использованием предложенного метода создавать голографические телевизионные

передачи, а также различные варианты устройств дополненной 3D-реальности, к тому же работающих в реальном времени и с комплексированием изображений в разных диапазонах электромагнитного спектра.

Также предложенный метод может быть использован в задачах распознавания образа и в задачах технического зрения.

Литература

1. Денисюк, Ю.Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения / Ю.Н. Денисюк // Доклады Академии наук СССР. – 1962. – Т. 144, № 6. – С. 1275-1278.
2. Van Heerden, P.J. A new optical method of storing and retrieving information / P.J. Van Heerden // Applied Optics. – 1963. – Vol. 2, Issue 4. – P. 387-392.
3. Hill, B. Some aspects of a large capacity holographic memory / B. Hill // Applied Optics. – 1972. – Vol. 11, Issue 1. – P. 182-196.
4. U.S. Patent 2006/0187297 A1 H 04 N 13/00, H 04 N 5/89, 348/40. Holographic 3-D television / L. Onural, filed of June 23, 2005, published of August 24, 2006.
5. Гибин, И.С. Программируемое голограммное ЗУ с записью и считыванием информации / И.С. Гибин, Т.Н. Мантуш, Ю.Е. Нестерихин, Б.Н. Панков, Е.Ф. Пен, П.Е. Твердохлеб // Автометрия. – 1975. – № 3. – С. 3-11.
6. А. с. 701350 СССР. Голографическое запоминающее устройство / С.И. Соскин, С.А. Шойдин, В.И. Левин (СССР). – 2468584/18-25; заявл. 01.04.77; опубл. 01.04.1977, зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 1979 за № 2468584 г.
7. Соскин, С.И. Расчет оптической схемы голографического запоминающего устройства / С.И. Соскин, С.А. Шойдин // Оптика и спектроскопия. – 1978. – Т. 44, № 3. – С. 566-573.
8. Выдрин, Л.В. Экспериментальная оптико-электронная (голографическая) система памяти / Л.В. Выдрин, Н.Н. Вьюхина, И.С. Гибин, В.Н. Затолокин, С.Ф. Кибирев, Т.Н. Мантуш, Ю.Е. Нестерихин, Б.Н. Панков, Е.Ф. Пен, П.Е. Твердохлеб, Ю.Н. Тищенко, А.В. Трубецкой // Автометрия. – 1980. – № 2. – С. 60-67.
9. Betin, A.Yu. Holographic memory optical system based on computer-generated Fourier holograms / A.Yu. Betin, V.I. Bobrinev, S.S. Donchenko, S.B. Odinkov, N.N. Evtikhiev, R.S. Starikov, S.N. Starikov, E.Yu. Zlokazov // Applied Optics. – 2013. – Vol. 52, № 33. – P. 8142-8145.
10. Шеннон, К. Работы по теории информации и кибернетики / К. Шеннон; пер. с англ. – М.: Иностранная литература, 1963. – 547 с.
11. Комар, В.Г. Новое в мировой кинотехнике / В.Г. Комар. – М.: Искусство, 1967. – С. 19.
12. Рапопорт, Б.И. Возможности передачи голографического изображения малокадровой телевизионной системой / Б.И. Рапопорт // Техника кино и телевидения. – 1971. – № 9. – С. 42.
13. Энциклопедия по машиностроению XXL. Голографическое кино и телевидение [Электронный ресурс]. – URL: <https://mash-xxl.info/info/565185> (дата обращения 22.01.2020 г.).
14. Пат. 2707582 Российская Федерация G 03 H 1/00, G 03 H 1/08, G 03 H 1/0866. Способ дистанционного формирования голографической записи / Шойдин С.А.; патентообладатель Шойдин С.А.; № 2018124440, заявл. 03.07.2018, опубл. 28.11.2019, Бюл. № 34. – 19 с.: ил.
15. Малакара, Д. Оптический производственный контроль / Д. Малакара. – М.: Машиностроение, 1985. – С. 316.
16. Волосов, Д.С. Фотографическая оптика / Д.С. Волосов. – М.: Искусство, 1978. – С. 464.
17. Никольский, Б.А. Основы радиотехнических систем : Учебник / Б.А. Никольский. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва, 2013. – 469 с.

Сведения об авторе

Шойдин Сергей Александрович, 1952 года рождения, в 1974 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности 03.03.02 (011200.62) «Физика», имеет диплом того же университета по специальности 01.03.04 (231300.62) «Прикладная математика», работает доцентом Сибирского государственного университета геосистем и технологий. Область научных интересов: голография, оптическая обработка информации. E-mail: shoydin@snga.ru.

ГРНТИ: 47.37.29

Поступила в редакцию 26 января 2020 г. Окончательный вариант – 4 марта 2020 г.

Synthesis of holograms received by a communication channel

S.A. Shoydin¹

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

Abstract

A method for the synthesis of holograms that reconstruct a 3D image using two 2D images, including a topographic map of the surface of a 3D object and photographs of the texture of its surface obtained using coherent and incoherent radiation is proposed. The method is suitable for transmitting information about a 3D object via a communication channel at a distance and subsequent synthesis of holograms at a distance from the holography object. It can be used in augmented reality devices, when creating holographic cameras and 3D video cameras, in 3D projectors and microscopes, devices with a synthesized aperture. The proposed method for the remote hologram synthesis is suitable for reproducing 3D holographic images of distant objects at different parts of the electromagnetic spectrum. Examples of 3D image restoration in the infrared spectral range are given. The method is also suitable for the synthesis of holograms in the UV, THz, and even radio range.

Keywords: laser, hologram, hologram information capacity, augmented reality, holographic television.

Citation: Shoydin SA. Synthesis of holograms received by a communication channel. *Computer Optics* 2020; 44(4): 547-551. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-694.

References

- [1] Denisjuk YuN. On the mapping of the optical properties of an object in the wave field of radiation scattered by it. *Doklady Akademii Nauk SSSR* 1962; 144(6): 1275-1278.
- [2] Van Heerden PJ. A new optical method of storing and retrieving information. *Appl Opt* 1963; 2(4): 387-392.
- [3] Hill B. Some aspects of a large capacity holographic memory. *Appl Opt* 1972; 11(1): 182-196.
- [4] Onural L. Holographic 3-D television. Patent US 2006/0187297 A1 of August 24, 2006.
- [5] Gibin IS, Mantush TN, Nesterikhin YuE, Pankov BN, Pen EF, Tverdohle PE. Programmable hologram memory with writing and reading information [In Russian]. *Avtometriya* 1975; 3: 3-11.
- [6] Soskin SI, Shoydin SA, Levin VI. Holographic storage device [In Russian]. Pat USSR of Invent N 701350 of April 1, 1977.
- [7] Soskin SI, Shoydin SA. Calculation of the optical scheme of the holographic storage device [In Russian]. *Optika i Spektroskopiya* 1978; 44(3): 566-573.
- [8] Vydrin LV, Vyukhina NN, Gibin IS, Zatolokin VN, Kibirev SF, Mantush TN, Nesterikhin YuE, Pankov BN, Pen EF, Tverdokhle PE, Tishchenko YuN, Trubetskoy AV. Experimental optoelectronic (holographic) memory system [In Russian]. *Avtometriya* 1980; 2: 60-67.
- [9] Betin AYU, Bobrinev VI, Donchenko SS, Odnokov SB, Evtikhiev NN, Starikov RS, Starikov SN, Zlokazov EYu. Holographic memory optical system based on computer-generated Fourier holograms. *Appl Opt* 2013; 52(33): 8142-8145.
- [10] Shannon CE. Recent development in communication theory. *Electronics* 1950; April: 80-83.
- [11] Komar VG. New in the world of film technology [In Russian]. Moscow: "Iskusstvo" Publisher; 1967: 19.
- [12] Rapoport BI. Possibilities for transmitting holographic images by a low-frame television system [In Russian]. *Tehnika Kino i Televidenia* 1971; 9: 42.
- [13] Encyclopedia of mechanical engineering XXL. Holographic film and television [In Russian]. Source: <https://mash-xxl.info/info/565185>.
- [14] Shoydin SA. Method of holographic recording remote formation [In Russian], Pat RF of Invent N 2707582 of November 28, 2019, Russian Bull of Inventions N34, 2019.
- [15] Malakara D. Optical shop testing. New York: John Wiley and Sons; 1985.
- [16] Volosov DS. Photographic optics [In Russian]. Moscow: "Iskusstvo" Publisher; 1978: 464.
- [17] Nikolsky BA. Fundamentals of radio systems. Textbook [In Russian]. Samara: "Samara State Aerospace University named S.P. Korolev" Publisher; 2013.

Author's information

Sergey Aleksanrovich Shoydin (b. 1952) graduated from Novosibirsk State University in 1974, majoring in Physics 03.03.02 (011200.62), holds a diploma from the same university with a degree in Applied Mathematics 01.03.04 (231300.62), works Associate Professor of the Siberian State University of Geosystems and Technologies. Research interests: holography, optical processing of information. E-mail: shoydin@ssga.ru.

Received January 26, 2020. The final version – March 4, 2020.
