

*С. А. Шойдин¹**

Проблемы информационной избыточности голограмм

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация
*e-mail: shoydin@ssga.ru

Аннотация. Обсуждается задача поиска путей снятия противоречия между большими объемами голографической информации и объемами, воспринимаемыми человеком. Эта задача является актуальной при разработке голографического ТВ и систем 3D дополненной реальности. Решение проблемы эффективного преобразования оптической информации, показывающее возможность передачи по радиоканалу динамических объемных изображений с принятой в современных ТВ системах частотой кадровой развертки и качественного, на уровне стандартов высокого разрешения, восстановленного голограммой 3D изображения, подобно Full HD, но обладающего непрерывным вертикальным и горизонтальным параллаксом, открывает новые возможности. Это позволяет найти новые решения и в дистанционной хирургии, и в задачах сближения и стыковки с неподготовленными к этой операции космическими и подводными телами, и во многих других.

Ключевые слова: голография, голографическая информация, сжатие информации, голографические преобразования

*S. A. Shoydin¹**

Problems of Informational Redundancy of Holograms

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
*e-mail: shoydin@ssga.ru

Abstract. The problem of finding ways to remove the contradiction between large volumes of holographic information and volumes perceived by humans is discussed. This task is relevant when solving the problem of holographic TV and 3D augmented reality. It is possible to solve the problem of efficient conversion of optical information, showing the possibility of transmitting dynamic three-dimensional images over the radio channel with the frame scan frequency adopted in modern TV systems and high-quality, high-resolution standards of a 3D image restored by a hologram, like Full HD with continuous vertical and horizontal parallax. This makes it possible to find new solutions both in remote surgery and in the tasks of rendezvous and docking with space and underwater bodies unprepared for this operation, and in many others.

Keywords: holography, holographic information, information compression, holographic transformations

Введение

Практически сразу, после появления первых работ Ю. Н. Денисюка [1] и Э. Лейта с Ю. Упатниексом [2], в которых говорится о возможности хранения полной информации об объекте, появляются работы, в которых предлагается использовать голограммы для записи и хранения информации в двоичном коде

в качестве памяти вычислительных систем (рис. 1), что отражено во множестве публикаций, включая работы В. Hill [3], Р. J. Van Heerden [4], сотрудников НИИСИ под руководством А. Л. Микаэляна [5], ИАЭ СО РАН под руководством И. С. Гибина, Ю. Е. Нестерихина, П. Е. Твердохлеба, Е. Ф. Пена [6], сотрудников ЦКБ Точприбор С. И. Соскина, С. А. Шойдина [7], сотрудников МГТУ им. Н.Э. Баумана, под руководством С. Б. Одинокова [8] и многих других...

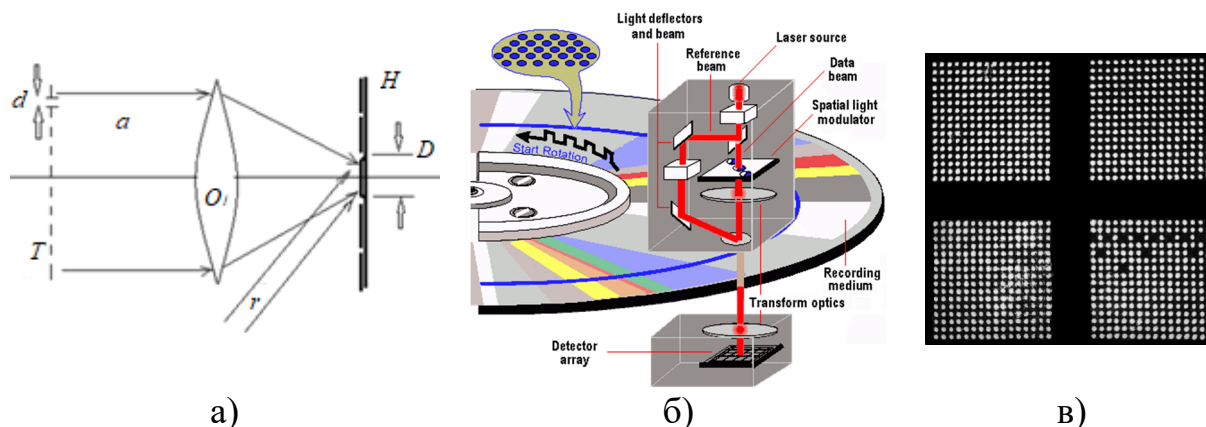


Рис. 1. Голографическая запись бинарной информации: а) принципиальная оптическая схема; б) схема устройства записи фурье голограмм; в) матрица восстановленного голограммой изображения из бинарных субматриц

Информационная избыточность голограмм

Первые оценки плотности записи информации обнадеживали, но большая информационная емкость голограмм помешала дальнейшему развитию голографического кино и телевидения. Известно [9], что количество информации N в голограмме (рис. 1а) в безаберрационном приближении можно оценить по формуле:

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

где N_h – число элементарных голограмм на носителе площадью S_h ; N_t – число бинарных точек, размером d , на транспаранте площадью S_t , записываемых на элементарную голограмму диаметром D ; $\omega \approx \sqrt{S_t} / f$ – относительное отверстие; ω/λ – величина, обратно пропорциональная размеру пятна Эйри.

В идеальном, безаберрационном случае размер элементарной голограммы обратно пропорционален дифракционному пятну от ячейки транспаранта $D = \lambda \cdot f / d$, и поэтому не имеет значения, а формула (1) годится для оценки информационной емкости голограмм любых размеров.

Для голограмм, размером А4 (210×297 мм), при $\omega=1$ и $\lambda=0,63$ мкм количество точек этого размера в голограмме достигает $n=1,5 \cdot 10^{11}$, что при бинарном

представлении кодирует 18 Гб и эквивалентно информации, содержащейся в полтора часовом кинофильме стандарта Full HD (диск Blu-ray). Однако, каждая из этих точек несет в себе разные значения яркости, поэтому простая формула (1) принимает по Шеннону [10] вид:

$$N = W_x \cdot W_y \cdot \log_2 \left(1 + \frac{I_s}{I_n} \right) = S_h \cdot \left(\frac{\omega}{\lambda} \right)^2 \cdot \log_2 \left(1 + \frac{I_s}{I_n} \right) \quad (2)$$

Здесь W_x и W_y – максимальные пространственные частоты по осям x , y соответственно. При реальном количестве градаций яркости $m = 256$, что соответствует цифровому стандарту TrueColor, общая информационная емкость возрастает до $N = 3 \cdot 150$ Гб (RGB). Передача таких массивов с частотой кадровой развертки 25 Гц требует пропускной способности двоичного цифрового канала $C = 11 \cdot 10^{12}$ байт/сек. Ширина полосы пропускания W_t в одномерном радиоканале

$$W_t = C / \log_2 \left(1 + \frac{I_s}{I_n} \right) \quad (3)$$

составит более 1400 ГГц. Это многократно перекрывает весь доступный сегодня радиодиапазон.

В то же время, следует обратить внимание на высокое качество современных стандартов TV высокой четкости, например Full HD, один кадр которого строится всего из 1920×1080 пикселей. Нам оно кажется совершенным, мы не ощущаем необходимости перехода на следующий уровень – 4К, не говоря уже о 8К, хотя емкости последних также далеки от голографических. При этом кадр Full HD содержит информации на пять порядков меньше приведенного выше голографического. Значит, для зрительного восприятия достаточно существенно меньших объемов информации, чем несет голограмма.

Возникает вопрос, а как же тогда было создано В. Г. Комаром (рис. 2) известное голографическое кино? Голографистам повезло, фототехнологии на заре голографии уже существовали. Фотоматериалы с разрешением 10 тыс. лин/мм и более уже выпускали: ПО «Славич», Agfa-Gevaert, Fujifilm и др. Кажется, до голографического TV – один шаг, но информационная емкость голограмм закрыла прямые пути решения, которыми пользовался В. Г. Комар [11]. Двумерное кодирование голографического видеоконтента на двумерных фотографических носителях оказалось возможно, а его передача по одномерному радиоканалу – нет.

Альтернативными путями, занимающими промежуточное положение по информационной емкости, стали: в компьютерном представлении полигональная (рис. 3а,б) [12] и воксельная (рис. 3в) графика [13].



Рис. 2. Голографический кинематограф: а) голографический проектор; б) автор проекта В. Г. Комар, в) фрагмент голографической видеоленты

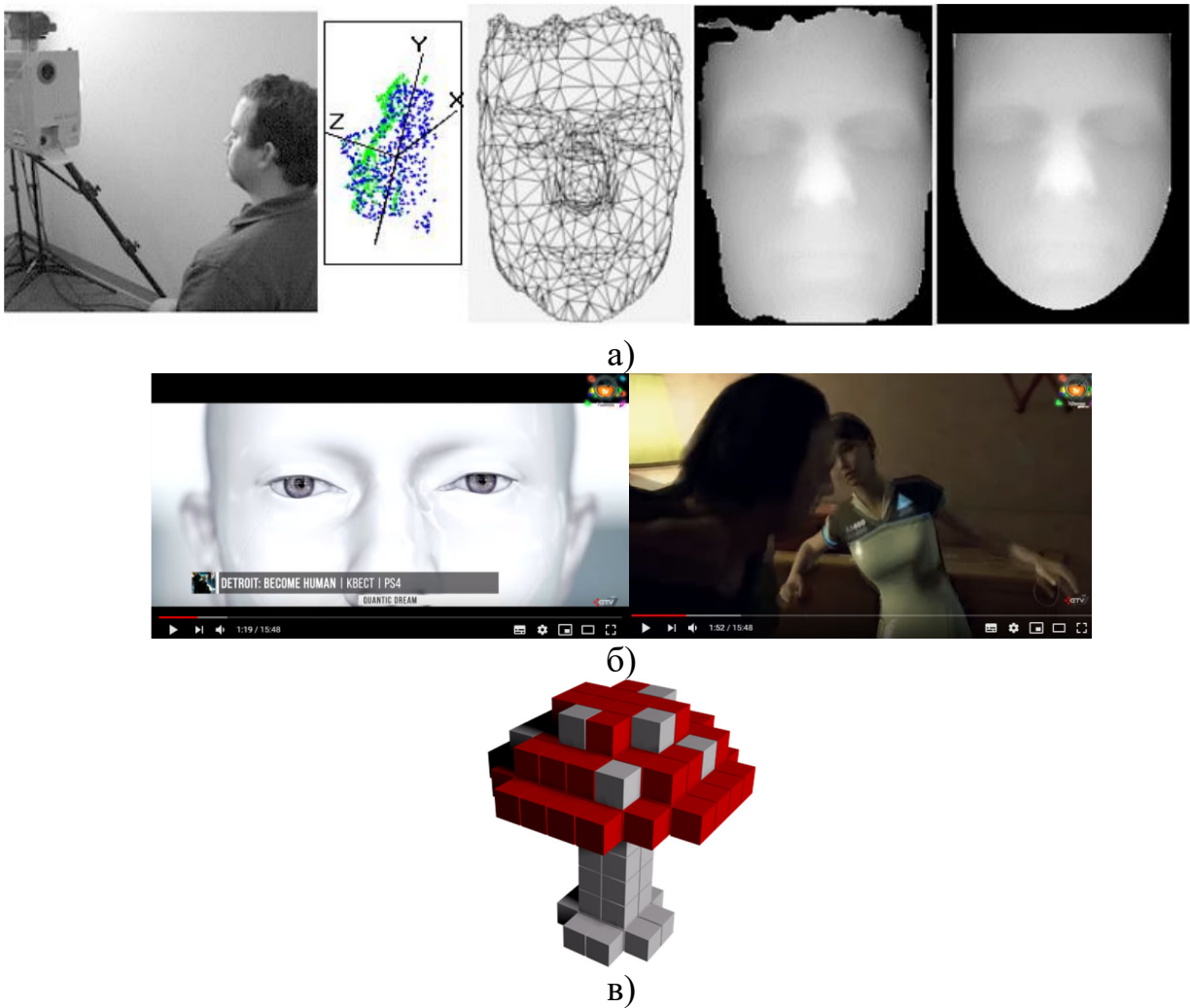


Рис. 3. Полигональная (а, б) и воксельная (в) графика: а) разбиение 3D поверхности на сопряженные треугольники (полигоны); б) создание текстуры наполнением каждого полигона своим цветом; в) воксельная, удобна при развитии объекта переходящего от однсвязанного объекта к многосвязанным

В полигональной графике каждый полигон, чаще всего представляющий собой треугольник неправильной формы, задается тремя точками и наполняется

своим цветом, создавая текстуру поверхности. Качественное изображение поверхности при этом требует слишком большого количества точек. Прямое представление объема, характерное для данных типов графики, предъявляет слишком большие требования компьютерного рендеринга, что до сих пор существенно ограничивает их возможности. Каждый может это проверить, наблюдая как нереально выглядят компьютерные фигурки видеоигр, хотя для их рендеринга применяются самые развитые технологии Hard и Soft. Если в полигональной технологии каждый элемент поверхности задается треугольником из трех точек, то в воксельной – восемь, со всеми вытекающими последствиями.

Нишу объемного видео с эффектом присутствия пыталась занять технология дисплеев светового поля (рис. 4) [14]. Однако имманентно присущее этой технологии А/С противоречие, когда аккомодация при настройке на резкость дает одно ощущение глубины, а дивергенция направления оптических осей глаз – другое, не позволило ей широко распространиться. Сегодня она, наряду со своим предшественником – стереокино, уходит ввиду того, что такой конфликт противоестественен и не может человеком восприниматься безболезненно.

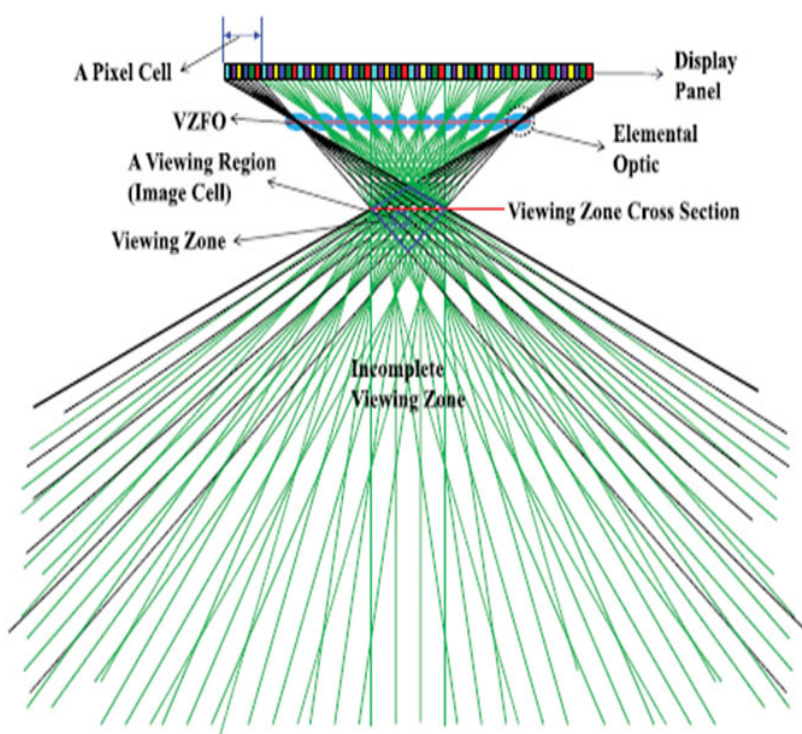


Рис. 4. Принципиальная схема дисплея светового поля [13]

Результаты

Таким образом, огромная информационная емкость голограмм, полезная во многих задачах, с голографическим TV и задачами 3D дополненной реальности сыграла злую шутку. Исследование вопроса показало следующее.

1. Актуальность проблемы кратко сформулировал еще Ю.Н. Денисюк [15], назвав свою работу «Достаточно ли известны фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объемного кинематографа и искусственного интеллекта?»

2. Бесперспективность энтропийного кодирования для сжатия голограмм демонстрируют двадцатилетние усилия множества разработчиков, что показал Mark Lucente [16] на примере обзоров группы Pleno, обладателя прав на кодирование двумерных массивов JPEG.

3. В своем анализе наиболее перспективных направлений работы по созданию голографического TV David Blinder [14] приходит к следующим выводам:

- при создании голографического контента с использованием методов компьютерной голографии (CGH) требуются алгоритмы, значительно отличающиеся от алгоритмов, необходимых для классического синтетического изображения;

- наиболее естественное 3D изображение с непрерывным параллаксом получается только при восстановлении голограмм;

- для эффективного представления голографического сигнала в цифровой форме требуется рендеринг, основанный на физике лучевого пространства.

Заключение

Известно, что только голографический метод дает не только наиболее полное восприятие объема (аккомодацией, вергенцией, окклюзией, нелаамбертовским затенением и параллаксом движения), а еще и обладает уникальным свойством восстановления 3D сцены перед экраном голографического монитора, непосредственно в пространстве наблюдателя, чего нет ни в одной другой технологии [16]. Поэтому, на основе рассмотрения достоинств и недостатков известных технологий воспроизведения объемных изображений (полигональной, воксельной, облака точек, технологии Pleno, микропробоев и дисплеев светового поля) в сравнении с голографическими, с учетом трудностей прямого энтропийного сжатия голографической информации [17], можно считать, что в ближайшее время наиболее актуальными становятся следующие задачи:

1) исследовать физические свойства голограмм для определения методов преобразования и сжатия передаваемой 3D голографической информации;

2) исследовать проблемы синтеза компьютерных голограмм и их физической реализации с использованием эффективных методов представления объема, например, метода регистрации карты высот, включая вопросы формирования непрерывного горизонтального и вертикального параллакса;

3) исследовать физические причины имманентно присущих голограммам и принципиально неустранимых в полной мере ограничений дифракционной эффективности и энтропии, влияющих на логарифмическую компоненту формулы Шеннона (2);

4) провести физические эксперименты по передаче необходимой информации с TV частотой кадровой развертки, достаточной для синтеза аналоговой го-

лограммы, записанной на материальном носителе на приемном конце канала связи.

Решение этих задач позволит осуществлять передачу голографического контента по существующим радиоканалам и решит проблему голографического TV и 3D дополненной реальности, которые востребованы как в задачах удаленной хирургии, так и в задачах сближения и стыковки (рис. 5) с неподготовленными к этой операции космическими и подводными телами.



Рис. 5. Задача определения границ объемного тела неизвестной природы

Известно, что наряду с проблемой стыковки космических и подводных аппаратов, в конструкцию которых заложены стыковочные узлы, все большую актуальность приобретает задача стыковки (перехвата) неподготовленных к стыковке объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денисюк Ю. Н. Достаточно ли известны фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объемного кинематографа и искусственного интеллекта? / Ю. Н. Денисюк // Журнал технической физики. – 1991. – Т. 61. – № 8. – С. 149–161.
2. Leith E. N. Reconstructed Wavefronts and Communication Theory / E. N. Leith, J. Upatnieks // Journal of the Optical Society of America. – 1962. – Vol. 52. – P.1123–1130.
3. Hill B. Some Aspects of a Large Capacity Holographic Memory / B. Hill // Applied Optics. – 1972. – Т. 11. – № 1. – С. 182–191. <https://doi.org/10.1364/AO.11.000182>.
4. Van Heerden P. J. A New Optical Method of Storing and Retrieving Information / P. J. van Heerden // Applied Optics. – 1963. – Т. 2. – № 4. – С. 387–392. <https://doi.org/10.1364/AO.2.000387>.
5. Микаэлян А. Л. Возможности применения методов голографии для создания новых типов запоминающих устройств / А. Л. Микаэлян, В. И. Бобринев, С. М. Наумов, Л. З. Соколова // Радиотехника и электроника. – 1969. – Т. 14. – № 1. – С. 115–123.
6. 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. – Т. 11. – № 3. – С. 3–11.
7. Соскин С. И., Шойдин С. А., Левин В. И.; Голографическое запоминающее устройство. Авторское свидетельство № 701350, СССР, 1979 г, зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР за № 2468584 от 01.04.1977 г.

8. Odinokov S. B. Optical memory system based on incoherent recorder and coherent reader of multiplexed computer generated one-dimensional Fourier transform holograms / S. B. Odinokov, E. Yu. Zlokazov, S. S. Donchenko, N. M. Verenikina // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2017. – V. 56 – № 9S. – P. 09NA02. <http://doi.org/10.7567/JJAP.56.09NA02>.
9. 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.
10. Shannon C. E. *Recent Developments in Communications Theory, Electronics*, vol. 99, pp. 80-83, April, 1950.
11. Комар В. Г. Информационная оценка качества изображения кинематографических систем. – *Техника кино и телевидения*. – 1971/ – №10. С. 9–22.
10. Shoydin S. A. Structured light patterns work like a hologram / S. A. Shoydin, A. L. Pazoev // *Applied Sciences*. – 2023. – Т. 13. – № 6. – С. 4037–4050. <https://doi.org/10.3390/app13064037>.
12. Botsch, M. Geometric modeling based on polygonal meshes / M. Botsch, M. Pauly, L. Kobbelt, P. Alliez, B. Lévy, S. Bischoff, C. Rössl / *ACM SIGGRAPH 2007 Courses on – SIGGRAPH '07*. – 2007. – <https://doi.org/10.1145/1281500.1281640>.
13. Huang M. An Efficient Encoding Voxel-Based Segmentation (EVBS) Algorithm Based on Fast Adjacent Voxel Search for Point Cloud Plane Segmentation / M. Huang, P. Wei, X. Liu // *Remote Sensing*. – 2019. – Т. 11. – № 23. – С. 2727. <https://doi.org/10.3390/rs11232727>.
14. Blinder D. Signal processing challenges for digital holographic video display systems / D. Blinder, A. Ahar, S. Bettens, T. Birnbaum, A. Symeonidou, H. Ottevaere, C. Schretter, P. Schelkens // *Signal Processing: Image Communication*. – 2019. – Т. 70. – С. 114–130. <https://doi.org/10.1016/j.image.2018.09.014>.
15. Денисюк Ю. Н. Достаточно ли известны фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объемного кинематографа и искусственного интеллекта? / Ю. Н. Денисюк // *ЖТФ*. – 1991. – Т. 61. – № 8. – С. 155, 157.
16. Shoydin S. A. Application of Denisyuk's holograms in advertising / S. A. Shoydin // *Optical Memory and Neural Networks*. – 2013. – Т. 22. – № 4. – С. 272–274. <https://doi.org/10.3103/S1060992X1304012>.
17. Lucente M. The First 20 Years of Holographic Video – and the Next 20 // *SMPTE 2nd Annual International Conference on Stereoscopic 3D for Media and Entertainment*. New York, NY, June, 2011. https://www.researchgate.net/publication/268387890_The_First_20_Years_of_Holographic_Video_-_and_the_Next_20 (дата обращения: 18.01.2023).

© С. А. Шойдин, 2023