

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-21-27

УДК 535.421; 535.417

Передача 3D-голографической информации по радиоканалу методом, близким к SSB

Артём Леонович Пазоев¹, Сергей Александрович Шойдин²✉

^{1,2} Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, 630108, Российская Федерация

¹ pazoev-al2018@sgugit.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0302-4860>

² shoydin@ssga.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-2186-7928>

Аннотация

Предмет исследования. Приведены результаты исследования возможности передачи голографической информации по радиоканалу Wi-Fi 40 МГц. Показано, что использование для этого двух основных модальностей 3D-изображения — карты глубин голографируемого объекта и текстуры его поверхности достаточно для синтеза изображения на приемном конце канала связи полноценной голограммы, восстанавливающей объект голографирования с непрерывным вертикальным и горизонтальным параллаксами. **Метод.** Метод передачи 3D-голографической информации подобен известному в радиотехнике методу передачи информации на одной боковой полосе (Single-sideband modulation, SSB). Существенное отличие предложенного метода состоит в том, что пространственные частоты, образующие голограмму, являются результатом одновременной амплитудной и фазовой модуляции опорного сигнала. Это затрудняет их теоретический анализ. Экспериментальное подтверждение возможности такой передачи выполнено с использованием свободного FTP-клиента с открытым исходным кодом FileZilla. Применен протокол связи для передачи информации по беспроводному каналу Wi-Fi.

Основные результаты. Показано, что передаваемый информационный поток достаточен для синтеза на приемном конце канала связи голограммы, восстанавливающей 3D-изображения. При этом голографическое изображение динамически меняющегося объекта с телевизионной частотой кадровой развертки имеет непрерывный горизонтальный и вертикальный параллакс, а пространственное разрешение восстановленного изображения не хуже телевизионного изображения стандарта высокой четкости Full HD. **Практическая значимость.** Экспериментально подтверждена возможность передачи по радиоканалу всей необходимой информации для воспроизведения на приемном конце канала голографического 3D-видеопотока с разрешением не ниже, чем в стандартах телевидения высокой четкости с непрерывным параллаксом.

Ключевые слова

голография, голографическая информация, метод SSB

Ссылка для цитирования: Пазоев А.Л., Шойдин С.А. Передача 3D-голографической информации по радиоканалу методом, близким к SSB // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 1. С. 21–27. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-21-27

Transmission of 3D holographic information over a radio channel by a method close to SSB

Artem L. Pazoev¹, Sergey A. Shoydin²✉

^{1,2} Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, 630108, Russian Federation

¹ pazoev-al2018@sgugit.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0302-4860>

² shoydin@ssga.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-2186-7928>

Abstract

The results of the research on the possibility of transmitting holographic information over the Wi-Fi 40 MHz radio channel are presented. It is shown that the use of two main 3D image modalities for this, — a depth map of the

holographic object and the texture of its surface, is sufficient to synthesize a full-fledged hologram at the receiving end of the communication channel, restoring the holographic object with continuous vertical and horizontal parallax. The method of transmitting 3D holographic information is similar to the well-known in radio engineering method of transmitting information on one sideband (Single-sideband modulation, SSB). The essential difference of the proposed method is that the spatial frequencies forming the hologram are the result of simultaneous amplitude and phase modulation of the reference signal. This complicates their theoretical analysis. Experimental confirmation of the possibility of such a transfer was performed using a free FTP client with open source FileZilla. A communication protocol has been applied to transmit information over a wireless Wi-Fi channel. It is shown that the transmitted information stream is sufficient to synthesize a hologram reconstructing 3D images at the receiving end of the communication channel. At the same time, the holographic image of a dynamically changing object with a television frame rate has continuous horizontal and vertical parallax, and the spatial resolution of the restored image was no worse than a high-definition television image of Full HD. The possibility of transmitting all the necessary information over the radio channel to reproduce a holographic 3D video stream at the receiving end of the channel with a resolution not lower than in high-definition television standards with continuous parallax has been experimentally confirmed.

Keywords

holography, holographic information, SSB method

For citation: Pazoev A.L., Shoydin S.A. Transmission of 3D holographic information over a radio channel by a method close to SSB. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 1, pp. 21–27 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-21-27

Введение

Большие объемы голографической информации являются большим преимуществом в различных областях [1–5]. В то же время в области голографического телевидения (ТВ) и задачах дополненной реальности большие объемы информации — одно из существенных препятствий передачи голографической информации по каналам связи [6, 7]. Ю.Н. Денисюк [7] сформулировал данную проблему в заголовке своей работы: «Достаточно ли известны фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объемного кинематографа и искусственного интеллекта?». Прямыми решениями проблемы являются: либо существенное уменьшение размера голографического изображения, что плохо соответствует задачам дополненной реальности; либо сжатие голографической информации таким образом, чтобы ее объем не превышал разумных пределов, т. е. возможностей современных каналов связи 3G и 4G.

Оценка количества информации в кадре голографического телевидения

Оценку количества информации в классической аналоговой голограмме, записанной в видимом диапазоне длин волн форматом A4 можно провести по формуле Шеннона:

$$N = SW_x W_y \log(1 + m), \quad (1)$$

где S — площадь голограммы; W_x, W_y — x, y компоненты пространственных частот голограммы сфокусированных изображений, обратно пропорциональные длине волны λ , записывающего голограмму излучения; m — отношение сигнала и шума, или число дискрет яркости пикселей (в терминологии обработки фотографий — глубина цвета изображения).

При количестве дискретных значений каждого пикселя (глубине цвета) равном стандартному в ТВ-системах $m = 256$, получим результат оценки количества информации (1) в одном голографическом кадре — $1,7 \cdot 10^{11}$ Б.

Передача таких массивов с частотой кадровой развертки 25 Гц требует пропускной способности канала по Шеннону [8], оцениваемой по порядку величины, как $C = 4 \cdot 10^{12}$ Б/с.

Ширина полосы пропускания оценивается порядка 500 ГГц, что выводит такую передачу:

$$W = \frac{C}{\log_2(256)}$$

в терагерцовый диапазон [9], тем самым практически закрывая окно возможностей прямой передачи полной голографической информации по ТВ-каналам связи. Другими словами, прямая ТВ-трансляция 3D-кино Комара [10] невозможна.

Следовательно, требуется поиск путей сжатия голографической информации и желательно без существенных потерь.

Постановка задачи

Согласно патенту [11] основная информация о 3D движущемся живом объекте голографирования содержится в потоке двух модальностей 3D-изображения — карте глубин поверхности голографируемого объекта и текстуре его поверхности, что качественно имеет сходство с передачей сообщения на одной боковой полосе, без несущей (Single-sideband modulation, SSB), но отличается наличием амплитудной и фазовой модуляции сигнала. Анализ спектров этих мод и созданной по ним голограммы показывает существенный разрыв, обеспечивающий окно возможностей для эффективного сжатия передаваемой информации. Однако прямые математические методы энтропийного сжатия оказываются неэффективными, на что указывают работы [12–17]. Среди них находится и недавно созданная для кодирования объемных изображений группой «Объединенные фотографы» (Joint Photographic Experts Group, JPEG) группа P1eno [18], которая сумела продвинуться в коррекции фокусировки при не резкой съемке, но не получила значимых результатов в кодировании голограмм 3D-объектов.

Следовательно, требуется поиск путей, ограничивающих требуемую для передачи полосу пропускания 3D-голографической информации, эквивалентных сжатию информации без потерь. Один из способов изложен в патенте РФ № 2707582 [11].

Суть способа заключается в отказе от передачи по радиоканалу всей 3D-голографической информации, а передаче только двух 2D-видеопотоков с текстурой поверхности голографируемого объекта и картой глубин. Синтез цифровой голограммы при этом производится только на приемном конце канала связи. Основные проблемы создания таких изображений описаны в [19, 20], где теоретически доказана возможность сжатия 3D-голографической информации методом, близким по смыслу к SSB. В [19] приведен численный эксперимент, показывающий, что восстановленное такой голограммой на приемном конце канала связи изображение дает на порядок лучшее разрешение, чем при спектральном сжатии голограмм. В [20] показано распространение метода на инфракрасный, ультрафиолетовый и радиодиапазон электромагнитного спектра. Таким образом, для завершения первого этапа работ сжатия голографической информации требуется экспериментальное подтверждение возможности передачи представленной 3D-голографической видеoinформации о 3D-объекте голографирования и качественного восстановления 3D-изображения живого объекта голографирования с ТВ-частотой кадровой развертки.

Методика эксперимента по передаче 3D-голографической информации, синтеза голограммы и восстановления ее 3D-изображения с непрерывным параллаксом

Для задач дополненной реальности подходит широко распространенная и активно развивающаяся сегодня технология беспроводной передачи данных Wi-Fi. В настоящей работе исследована возможность обеспечения передачи видеопотока 3D-голографической информации по беспроводному каналу связи (Wi-Fi), с кадровой частотой больше 25 кадров/с.

С помощью протокола File Transfer Protocol (FTP) выполнен эксперимент по передаче голографической

информации по Wi-Fi с помощью двух основных модальностей 3D-изображения — текстуры и карты глубин 3D-сцены (рис. 1), которые служат основой 3D-модели объекта при синтезе голограмм на приемном конце канала связи [11].

Для передачи 3D-видеопотока, позволяющего сформировать на приемном конце канала связи голографические изображения, одновременно переданы пакеты по 291 двойному кадру. Измеренное программой «FileZilla» время передачи пакетов кадров при воспроизведении в реальном времени показало, что передача полной голографической информации о 3D-объекте в реальном времени с кадровой частотой большей, чем 25 кадров/с вполне осуществима.

В тестовом эксперименте использованы два устройства: персональный компьютер (ПК), с подключенным к нему через сетевой кабель (Ethernet) роутером (модель ELTEX NTE-RG-1421G-Wac rev. A1), и мобильное устройство на базе операционной системы (ОС) Android (модель Xiaomi Mi A1) со встроенным модулем Wi-Fi стандарта IEEE 802.11n.

Программное соединение между двумя устройствами установлено через протокол передачи файлов FTP. При таком типе соединения первое устройство является FTP-сервером, а второе — клиентом (подключается к серверу), при этом передача файлов может осуществляться в любом направлении.

На ПК использована программа «FileZilla», работающая с протоколом FTP, через нее будут отправляться команды по передаче данных. После передачи данных программа возвращает общее время отправки файла, на основе которого можно определить скорость передачи данных и кадровую частоту передачи.

На мобильном устройстве используется приложение ES-проводник (менеджер файлов — проводник), одной из функций которого является создание и работа с локальным FTP-сервером (рис. 2).

В качестве голографической информации, т. е. предварительных 3D-кадров для «голографического видео» использована серия из 291 монохромного кадра с 3D-портретом человека, время съемки зависит от выбранной аппаратуры и поэтому не учитывалось. Кадры текстуры и карты глубин поверхности сформированы

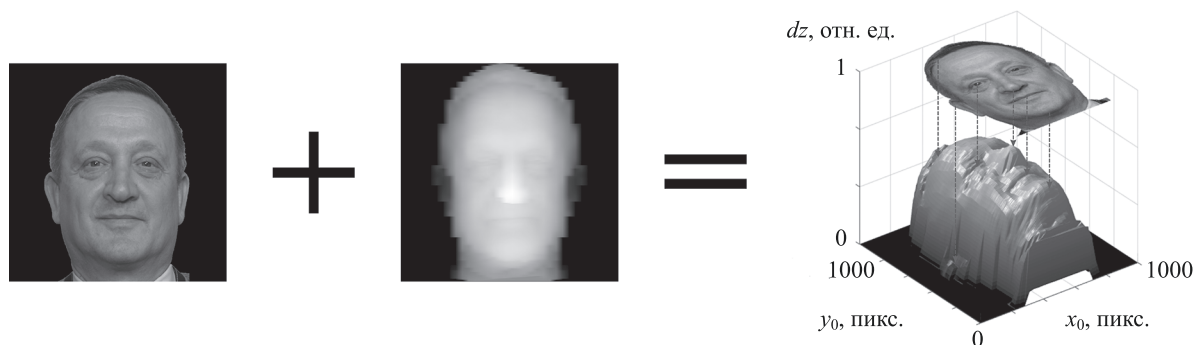


Рис. 1. Представление 3D-объекта в виде двух основных модальностей 3D-изображения — текстуры поверхности и карты глубин: x_0 и y_0 — ширина и высота поля основания 3D-изображения (в пикселах); dz — глубина 3D-изображения (на рисунке показана в относительных единицах)

Fig. 1. Representation of a 3D object in the form of two main 3D image modalities — surface textures and depth maps: x_0 and y_0 are the width and height of the 3D image base field (in pixels); dz — depth of the 3D image (shown in relative units in the figure)

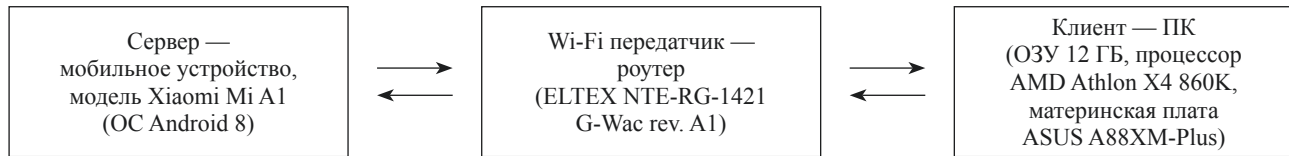


Рис. 2. Блок-схема устройства передачи информации

Fig. 2. Flowchart of the information transmission device

рованы с применением структурированного излучения аналогично с методикой [20], но от динамически меняющегося объекта. Фотографии некоторых кадров, из передаваемой серии кадров текстуры поверхности объекта и 3D-карты поверхности, приведены на рис. 3. Разрешение текстуры от 500×500 до 2000×2000 пикселей, и разные комбинации значений информационной емкости 3D-карты поверхности.

Результаты экспериментальных измерений

Результаты измерений времени передачи пакетов обработаны и собраны в таблице, в третьем столбце которой приведены форматы передаваемых кадров. Ввиду специфики применяемых программ преобразования Френеля, использованного при синтезе голограмм, связанной с аппаратом быстрого преобразования Фурье, на этапе эксперимента использовано представление кадров в виде квадратных матриц. Это привело к завышенным требованиям к пропускной способности канала, что

позволяет рассчитывать на передачу больших размеров кадров в дальнейшем. Видно, что разрешение передаваемых пар кадров текстуры и карты глубин изменяется от 500×500 пикселей, что близко к устаревшим ТВ-стандартам PAL и SECAM (720×576 пикселей), до 2000×2000 пикселей, что превышает разрешение в стандартах высокой четкости HD (1280×720 пикселей) и Full HD (1920×1080 пикселей). Выбранные форматы кадров соответствуют наиболее распространенным сегодня форматам с разной степенью сжатия. От метода синтеза голограммы количество передаваемой по каналу связи информации не зависит, и выбранная модель голограмм Лейта–Упатниекса не ограничивает общность полученных результатов. Таким образом, в эксперименте исследованы разные объемы пакетов передаваемых данных, что показало возможности метода для разных режимов передачи.

В таблице приведены: форматы файлов, в которые упаковываются передаваемые данные; общее количество передаваемой информации; указано измеренное

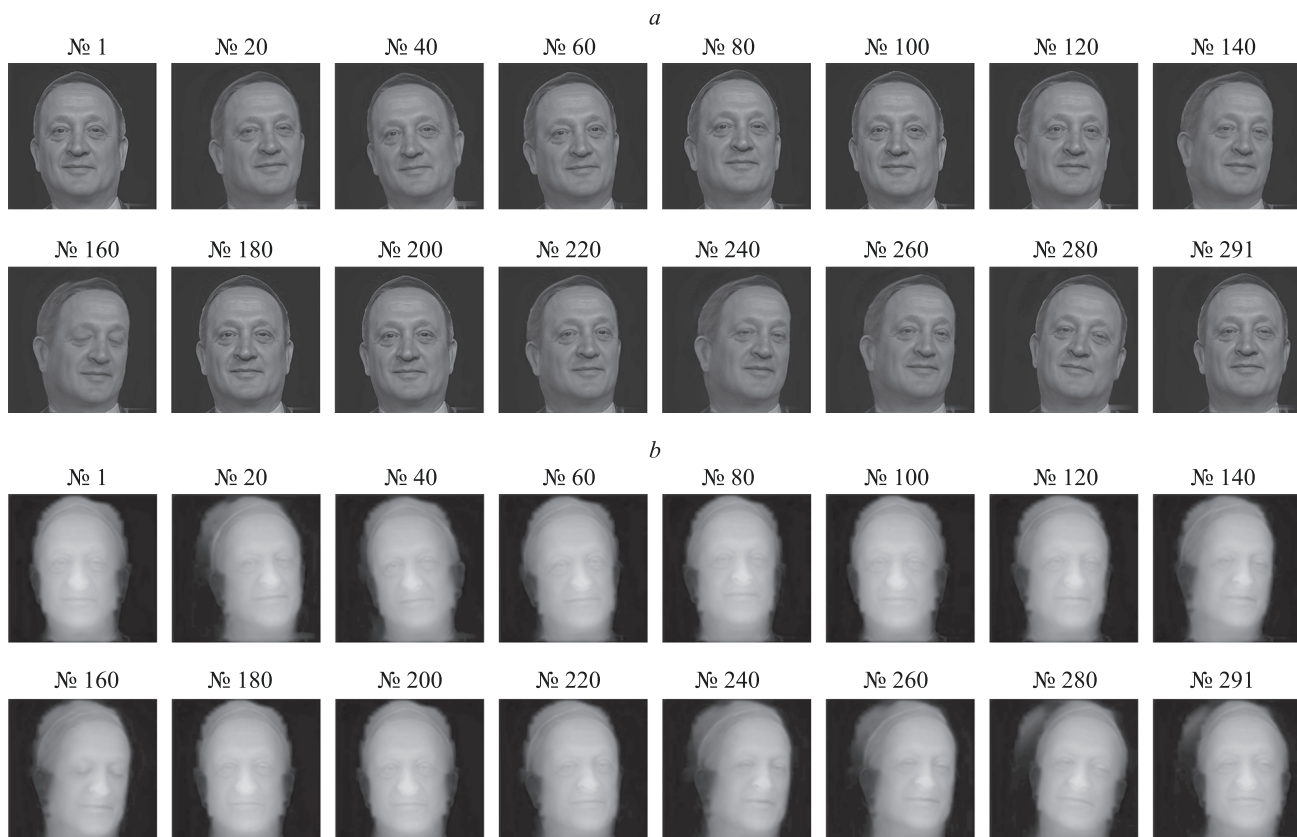


Рис. 3. Фотографии некоторых кадров из передаваемой серии, состоящей из 291 кадра 3D-видео: динамически изменяющейся текстуры поверхности объекта (a) и соответствующей кадрам текстуры карты поверхности (b)

Fig. 3. Photos of some frames from the transmitted series consisting of 291 frames of 3D video: dynamically changing texture of the surface of the object (a) and corresponding to the frames of the texture of the surface map (b)

Таблица. Время передачи пакетов и частота кадровой развертки

Table. Packet transmission time and frame rate

Номер эксперимента	Разрешение, пиксели (столбцы × строки)	Формат кадров	Объем пакета, МБ	Время передачи пакета при точности измерений 1 с, с	Вычисленная скорость передачи пакета, МБ/с	Кадровая частота при вычисленной скорости передачи, кадр/с	Кадровая частота при средней скорости передачи 11 МБ/с, кадр/с
1	500 × 500	BMP	139,4	13	10,72	22,39	22,96
2		PNG	28,4	3	9,46	97,00	112,71
3		JPG	6,7	1	6,70	291,00	477,76
4	1000 × 1000	BMP	555,6	51	10,89	5,71	5,76
5		PNG	66,3	5	13,23	58,20	48,28
6		JPG	18,6	1	18,60	291,00	172,09
7	2000 × 2000	BMP	2220,8	—	—	—	1,45
8		PNG	146,2	12	12,18	24,25	21,90
9		JPG	53,3	5	10,66	58,20	60,06

время передачи соответствующих пар кадров (прямые данные из программы «FileZilla»); скорость передачи данных каждого пакета; кадровая частота, вычисленная по скорости передачи каждого из экспериментов.

Видно, что в экспериментах № 2–3, 5–6 частота кадровой развертки оказалась больше 25 кадров/с. Это означает, что, например, для стандарта VGA и HD можно передавать 3D-голографическую информацию в формате PNG и JPEG без каких-либо затруднений. Для стандартов Full HD, 2K и выше (эксперименты № 8–9) — передача в формате PNG с частотой больше 25 кадров/с может быть затруднена, однако, в формате JPEG стандартного коэффициента качества 70 %, кадровая частота передачи по-прежнему остается в допустимых пределах.

Обсуждение результатов эксперимента

При использовании некоторых дополнительных мер скорость передачи может быть значительно увеличена, что, как следствие, повысит кадровую частоту передачи. Например, это возможно при передаче не квадратного кадра размером 2000 × 2000 пикселей, а вписанного в него и полностью соответствующего стандарту Full HD-кадра размером 1920 × 1080 пикселей. Это вполне возможно, и будет сделано при разработке прототипа установки голографического ТВ. Все варианты, приведенные в таблице, могут быть применены в устройствах 3D-дополненной реальности, как например: в телемедицине, системах дистанционного управления сложными объектами, включая системы безопасности, 3D-фототелеграфе и др.

По переданным по каналу связи 3D-голографическим изображениям выполнен синтез цифровых голограмм аналогично [20–23], по виртуально моделируемому излучению, повторяющему распространение в схеме Лейта–Упатниекса. Этими голограммами в дальнейшем были восстановлены виртуальные 3D-голографические изображения живого динамически меняющегося

объекта, обладающие как вертикальным, так и горизонтальным параллаксом (рис. 4). Их материальные аналоги были реализованы ранее в технологии Dot Matrix [24, 25].

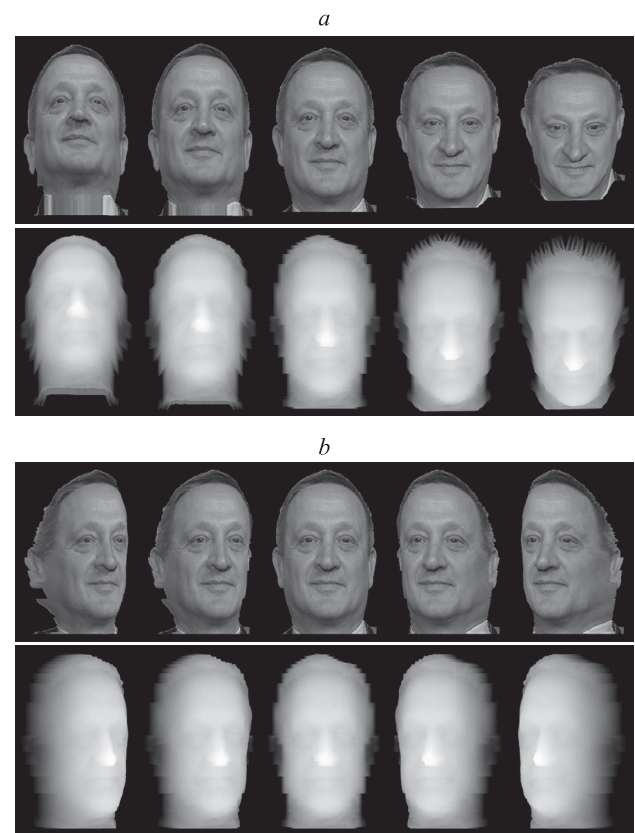


Рис. 4. Виртуальные 3D-голографические изображения с непрерывным параллаксом: с вертикальным (а) и горизонтальным (б)

Fig. 4. Virtual 3D holographic images with continuous parallax: vertical (a) and horizontal (b)

Заклучение

С помощью протокола FTP проведен эксперимент передачи по беспроводному каналу связи Wi-Fi информации в виде двух 2D-кадров для синтеза голограмм, восстанавливающих с непрерывным параллаксом 3D-изображения с телевизионной частотой кадровой развертки, имитирующих 3D-видео с пространственным разрешением не хуже, чем в телевизионных стан-

дартах высокой четкости, как например Full HD. С учетом серии предыдущих работ [11, 19–25], представленный в настоящей работе их заключительный этап, в котором экспериментально доказана возможность передачи динамической 3D-голографической информации, показывает один из возможных путей реализации задачи создания голографического телевидения и 3D-дополненной реальности.

Литература

References

1. Денисюк Ю.Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // Оптика и спектроскопия. 1963. Т. 15. № 4. С. 522–532.
2. Leith E.N., Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory // Journal of the Optical Society of America. 1962. V. 52. N 10. P. 1123–1130. <https://doi.org/10.1364/JOSA.52.001123>
3. Leith E.N., Upatnieks J. Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects // Journal of the Optical Society of America. 1964. V. 54. N 11. P. 1295–1301. <https://doi.org/10.1364/JOSA.54.001295>
4. Van Heerden P.J. A new optical method of storing and retrieving information // Applied Optics. 1963. V. 2. N 4. P. 387–392. <https://doi.org/10.1364/AO.2.000387>
5. Hill B. Some aspects of a large capacity holographic memory // Applied Optics. 1972. V. 11. N 1. P. 182–191. <https://doi.org/10.1364/AO.11.000182>
6. Титарь В.П., Богданова Т.В. Проблемы создания голографической телевизионной системы // Радиоэлектроника и информатика. 1999. № 2(7). С. 38–42.
7. Денисюк Ю.Н. Достаточны ли известные фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объемного кинематографа и искусственного интеллекта? // Журнал технической физики. 1991. Т. 61. № 8. С. 149–161.
8. Shannon C.E. Communication in the presence of noise // Proceedings of the IRE. 1949. V. 37. N 1. P. 10–21. <https://doi.org/10.1109/jrproc.1949.232969>
9. ГОСТ 24375-80. Радиосвязь. Термины и определения [Текст]: Дата введения 01.01.1980.
10. Комар В.Г. Информационная оценка качества изображения кинематографических систем // Техника кино и телевидения. 1971. № 10. С. 9–22.
11. Шойдин С.А. Способ дистанционного формирования голографической записи. Патент RU2707582C1. Бюл. 2019. № 34.
12. Naughton T.J., McDonald J.B., Javidi B. Efficient compression of Fresnel fields for internet transmission of three-dimensional images // Applied Optics. 2003. V. 42. N 23. P. 4758–4764. <https://doi.org/10.1364/AO.42.004758>
13. Yamaguchi I., Zhang T. Phase-shifting digital holography // Optics Letters. 1997. V. 22. N 16. P. 1268–1270. <https://doi.org/10.1364/OL.22.001268>
14. Blinder D., Ahar A., Bettens S., Birnbaum T., Symeonidou A., Ottevaere H., Schretter C., Schelkens P. Signal processing challenges for digital holographic video display systems // Signal Processing: Image Communication. 2019. V. 70. P. 114–130. <https://doi.org/10.1016/j.image.2018.09.014>
15. Bernardo M.V., Fernandes P., Arrifano A., Antonini M., Fonseca E., Fiadeiro P.T., Pinheiro A.M.G., Pereira M. Holographic representation: Hologram plane vs. object plane // Signal Processing: Image Communication. 2018. V. 68. P. 193–206. <https://doi.org/10.1016/j.image.2018.08.006>
16. Seo Y.-H., Choi H.-J., Kim D.-W. 3D scanning-based compression technique for digital hologram video // Signal Processing: Image Communication. 2007. V. 22. N 2. P. 144–156. <https://doi.org/10.1016/j.image.2006.11.007>
17. Naughton Th.J., McDonald J.B., Javidi B. Efficient compression of Fresnel fields for internet transmission of three-dimensional images // Applied Optics. 2003. V. 42. N 23. P. 4758–4764. <https://doi.org/10.1364/AO.42.004758>
18. Muhamad R.K., Birnbaum T., Gilles A., Mahmoudpour S., Oh K.-J., Pereira M., Perra C., Pinheiro A., Schelkens P. JPEG Pleno
1. Denisuk Iu.N. Displaying the optical properties of an object in the wave field of radiation scattered by it. *Optika i spektroskopija*, 1963, vol. 15, no. 4, pp. 522–532. (in Russian)
2. Leith E.N., Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory. *Journal of the Optical Society of America*, 1962, vol. 52, no. 10, pp. 1123–1130. <https://doi.org/10.1364/JOSA.52.001123>
3. Leith E.N., Upatnieks J. Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects. *Journal of the Optical Society of America*, 1964, vol. 54, no. 11, pp. 1295–1301. <https://doi.org/10.1364/JOSA.54.001295>
4. Van Heerden P.J. A new optical method of storing and retrieving information. *Applied Optics*, 1963, vol. 2, no. 4, pp. 387–392. <https://doi.org/10.1364/AO.2.000387>
5. Hill B. Some aspects of a large capacity holographic memory. *Applied Optics*, 1972, vol. 11, no. 1, pp. 182–191. <https://doi.org/10.1364/AO.11.000182>
6. Titar V.P., Bogdanova T.V. Problems of creating a holographic TV system. *Radioelektronika i informatika*, 1999, no. 2(7), pp. 38–42. (in Russian)
7. Denisuk Iu.N. Are the known fundamental principles of holography sufficient to create new types of 3D cinema and artificial intelligence? *Zhurnal tehniczeskoj fiziki*, 1991, vol. 61, no. 8, pp. 149–161. (in Russian)
8. Shannon C.E. Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IRE*, 1949, vol. 37, no. 1, pp. 10–21. <https://doi.org/10.1109/jrproc.1949.232969>
9. GOST 24375-80. *Radio communication. Terms and Definitions*. 01.01.1980. (in Russian)
10. Komar V.G. Informational assessment of the image quality of cinematographic systems. *Tehnika kino i televidenija*, 1971, no. 10, pp. 9–22. (in Russian)
11. Shoidin S.A. Method of holographic recording remote formation. *Patent RU2707582C1*. 2019. (in Russian)
12. Naughton T.J., McDonald J.B., Javidi B. Efficient compression of Fresnel fields for internet transmission of three-dimensional images. *Applied Optics*, 2003, vol. 42, no. 23, pp. 4758–4764. <https://doi.org/10.1364/AO.42.004758>
13. Yamaguchi I., Zhang T. Phase-shifting digital holography. *Optics Letters*, 1997, vol. 22, no. 16, pp. 1268–1270. <https://doi.org/10.1364/OL.22.001268>
14. Blinder D., Ahar A., Bettens S., Birnbaum T., Symeonidou A., Ottevaere H., Schretter C., Schelkens P. Signal processing challenges for digital holographic video display systems. *Signal Processing: Image Communication*, 2019, vol. 70, pp. 114–130. <https://doi.org/10.1016/j.image.2018.09.014>
15. Bernardo M.V., Fernandes P., Arrifano A., Antonini M., Fonseca E., Fiadeiro P.T., Pinheiro A.M.G., Pereira M. Holographic representation: Hologram plane vs. object plane. *Signal Processing: Image Communication*, 2018, vol. 68, pp. 193–206. <https://doi.org/10.1016/j.image.2018.08.006>
16. Seo Y.-H., Choi H.-J., Kim D.-W. 3D scanning-based compression technique for digital hologram video. *Signal Processing: Image Communication*, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 144–156. <https://doi.org/10.1016/j.image.2006.11.007>
17. Naughton Th.J., McDonald J.B., Javidi B. Efficient compression of Fresnel fields for internet transmission of three-dimensional images. *Applied Optics*, 2003, vol. 42, no. 23, pp. 4758–4764. <https://doi.org/10.1364/AO.42.004758>
18. Muhamad R.K., Birnbaum T., Gilles A., Mahmoudpour S., Oh K.-J., Pereira M., Perra C., Pinheiro A., Schelkens P. JPEG Pleno

- holography: scope and technology validation procedures // *Applied Optics*, 2021, V. 60, N 3, P. 641–651. <https://doi.org/10.1364/AO.404305>
19. Shoydin S.A., Pazojev A.L. Transmission of 3D holographic information via conventional communication channels and the possibility of multiplexing in the implementation of 3D hyperspectral images // *Photonics*, 2021, V. 8, N 10, P. 448–473. <https://doi.org/10.3390/photonics8100448>
 20. Shoydin S.A., Pazojev A.L. Remote formation of holographic record // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2021, V. 57, N 1, P. 80–88. <https://doi.org/10.3103/S8756699021010118>
 21. Пазоев А.Л., Шойдин С.А. Передача голографической информации на одной боковой полосе // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2021. Т. 8. С. 109–117. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-8-109-117>
 22. Шойдин С.А., Пазоев А.Л. Особенности синтеза SSB голограмм (SSBH) // *HoloExpo 2021: тезисы докладов XVII международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям*. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. С. 207–218.
 23. Шойдин С.А., Пазоев А.Л. Сжатие 3D голографической информации аналогично передаче информации на одной боковой полосе // *Оптический журнал*, 2022, Т. 89, № 3, С. 79–88. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-03-79-88>
 24. Шойдин С.А., Пазоев А.Л., Смык А.Ф., Шурыгин А.В. Синтезированные на приёмном конце канала связи голограммы 3D-объекта в технологии Dot Matrix // *Компьютерная оптика*, 2022, Т. 46, № 2, С. 204–213. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1037>
 25. Шойдин С.А., Пазоев А.Л., Цыганов И.К., Дроздова Е.А. Запись голограммы, переданной по каналу связи на одной боковой полосе // *HoloExpo 2021: тезисы докладов XVII международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям*. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. С. 109–117.
 - holography: scope and technology validation procedures. *Applied Optics*, 2021, vol. 60, no. 3, pp. 641–651. <https://doi.org/10.1364/AO.404305>
 19. Shoydin S.A., Pazojev A.L. Transmission of 3D holographic information via conventional communication channels and the possibility of multiplexing in the implementation of 3D hyperspectral images. *Photonics*, 2021, vol. 8, no. 10, pp. 448–473. <https://doi.org/10.3390/photonics8100448>
 20. Shoydin S.A., Pazojev A.L. Remote formation of holographic record. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2021, vol. 57, no. 1, pp. 80–88. <https://doi.org/10.3103/S8756699021010118>
 21. Pazojev A.L., Shoydin S.A. Transmission of holographic information on a single sideband. *Interexpo GEO-Siberia*, 2021, vol. 8, pp. 109–117. (in Russian). <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-8-109-117>
 22. Shoydin S.A., Pazojev A.L. Features of the SSB holograms synthesis (SSBH). *HoloExpo 2021: Abstracts of the XVII International Conference on Holography*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2021, pp. 207–218. (in Russian)
 23. Shoydin S.A., Pazojev A.L. Compressing 3D holographic information similar to data transmission via a single sideband. *Journal of Optical Technology*, 2022, vol. 89, no. 3, pp. 176–182. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000176>
 24. Shoydin S.A., Pazojev A.L., Smyk A.F., Shurygin A.V. 3D object holograms synthesized in Dot Matrix technology at the receiving end of the communication channel. *Computer Optics*, 2022, vol. 46, no. 2, pp. 204–213. (in Russian). <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1037>
 25. Shoydin S.A., Pazojev A.L., Tsyganov I.K., Drozdova E.A. Recording of a hologram transmitted over a single sideband communication channel. *HoloExpo 2021: Abstracts of the XVII International Conference on Holography*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2021, pp. 109–117. (in Russian)

Авторы

Пазоев Артём Леонович — преподаватель, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, 630108, Российская Федерация, [sc 57213689704](https://orcid.org/0000-0003-0302-4860), <https://orcid.org/0000-0003-0302-4860>, pazoev-al2018@sgugit.ru

Шойдин Сергей Александрович — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, 630108, Российская Федерация, [sc 56022582500](https://orcid.org/0000-0002-2186-7928), <https://orcid.org/0000-0002-2186-7928>, shoydin@snga.ru

Статья поступила в редакцию 17.08.2022
Одобрена после рецензирования 10.12.2022
Принята к печати 30.01.2023

Authors

Artem L. Pazojev — Lecturer, Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, 630108, Russian Federation, [sc 57213689704](https://orcid.org/0000-0003-0302-4860), <https://orcid.org/0000-0003-0302-4860>, pazoev-al2018@sgugit.ru

Sergey A. Shoydin — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Associate Professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, 630108, Russian Federation, [sc 56022582500](https://orcid.org/0000-0002-2186-7928), <https://orcid.org/0000-0002-2186-7928>, shoydin@snga.ru

Received 17.08.2022
Approved after reviewing 10.12.2022
Accepted 30.01.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»