



Received: 09.08.2024**Revised:** 07.11.2024**Accepted:** 22.11.2024**DOI:** 10.17804/2410-9908.2024.6.231-240

HOLOGRAPHIC METHODS FOR MANIPULATING REMOTE MECHANICAL DEVICES AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN AN AGGRESSIVE ENVIRONMENT

S. A. Shoydin

*Siberian State University of Geosystems and Technology,
10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia* <https://orcid.org/0000-0002-2186-7928>  shoydin@ssga.ruEmail: shoydin@ssga.ru

Address for correspondence: ul. Plakhotnogo, 10, Novosibirsk, 630108, Russia

Tel.: +7 (913) 915-0092

Robotic tasks of remote manipulation of mechanical objects have long been transferred from space to terrestrial ones, for example, the unmanned KAMAZ-6559 (Jupiter 30) is already being produced. Rostselmash is launching the production of unmanned combines based on TORUM 785, next in line are unmanned surface and underwater vehicles, not to mention operation in aggressive environments [1]. All devices of this class are equipped with a variety of sensors. All of them replace a live pilot, who has only one main sensor, namely vision, and one auxiliary, hearing (one eyewitness is better than ten hearsays). They are enough for a person to solve any of the most difficult navigation problems. Obviously, in robotics, further development will be closely related to 3D vision, which naturally echoes the problems of holography, especially with modern digital and computer holography. This paper analyzes one of the ways of modern development of digital holography, namely the transfer of holographic volumetric information about the surrounding space from the location of the artificial apparatus to the operator remotely exercising monitoring and control functions.

Keywords: holography, holographic TV, computer modeling, information transmission, remote control

References

1. Lokoshchenko, A.M. and Fomin, L.V. Modeling the processes of interaction of an aggressive medium with materials and structural elements. *Nauchnoe Obozrenie, Referativnyi zhurnal*, 2018, 1, 11–24. (In Russian). Available at: <https://abstract.science-review.ru/ru/article/view?id=1856>
2. Lucente, M. The first 20 years of holographic video – and the next 20. In: *SMPTE 2nd annual international conference on stereoscopic 3D for media and entertainment – Society of Motion Picture and Television Engineers (SMPTE)*, 2011
3. Titar, V.P. and Bogdanova, T.V. Problems of creating a holographic TV system. *Radioelektronika i Informatika*, 1999, 2 (7), 38–42. (In Russian).
4. Denisyuk, Yu.N. Are the known basic principles of holography adequate for creating new types of 3-dimensional cinematography and artificial-intelligence? *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, 1991, 61 (8), 149–161. (In Russian).
5. Shoydin, S.A. and Pazoev, A.L. Compressing 3D holographic information similar to data transmission via a single sideband. *Journal of Optical Technology*, 2022, 89 (3), 176–182. DOI: 10.1364/JOT.89.000176.

6. Takeda, M. Fourier fringe analysis and its application to metrology of extreme physical phenomena: a review (invited). *Applied Optics*, 2013, 52 (1), 20–29. DOI: 10.1364/AO.52.000020.
7. Shoydin, S.A. RF Patent No. 2707582, Byull. Izobret. No. 34, 2019.
8. Shoidin, S.A. and Pazoev, A.L. Remote formation of holographic record. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2021, 57 (1), 80–88. DOI: 10.3103/S8756699021010118.
9. Pazoev, A.L. and Shoydin, S.A. Transmission of 3D holographic information over a radio channel by a method close to SSB. *Nauchno-Tekhnicheskiy Vestnik Informatsionnykh Tekhnologiy, Mekhaniki i Optiki*, 2023, 23 (1), 21–27. (In Russian). DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-21-27.

Подана в журнал: 09.08.2024



УДК 535.4:004.94:681.772

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.6.231-240

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МАНИПУЛИРОВАНИЯ УДАЛЕННЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ УСТРОЙСТВАМИ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В АГРЕССИВНОЙ СРЕДЕ

С. А. Шойдин

*Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»,
ул. Плехотного, 10, Новосибирск, 630108, Россия*

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

Электронная почта: shoydin@ssga.ru

Адрес для переписки: ул. Плехотного, д. 10, г. Новосибирск, 630108, Россия

Тел: +7 (913) 915-00-92

Робототехнические задачи удаленной манипуляции механическими объектами из космических давно перешли к земным. Например, уже выпускается беспилотный КАМАЗ-6559 (Юпитер 30). Ростсельмаш запускает производство беспилотных комбайнов на базе TORUM 785, на очереди беспилотные надводные и подводные аппараты, не говоря уже о работе в агрессивных средах [1]. Все аппараты такого класса оснащены множеством разнообразных датчиков. Вся их совокупность заменяет живого пилота, у которого есть только один основной тип датчика – зрение – и один вспомогательный – слух (лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать). Их человеку достаточно для решения любых самых сложных проблем навигации. Очевидно, что и в робототехнике дальнейшее развитие будет тесно связано с 3D-зрением, что естественно перекликается с задачами голографии, особенно с современной цифровой и компьютерной голографией. Анализу одного из путей современного развития цифровой голографии, а именно передаче голографической объемной информации об окружающем пространстве от местоположения искусственного аппарата к оператору, удаленно осуществляющему контроль и функции управления, посвящена настоящая статья.

Ключевые слова: голография, голографическое TV, компьютерное моделирование, передача информации, удаленный контроль

1. Введение

Огромная информационная емкость голограмм встала на пути создания голографического цифрового видео и 3D дополненной реальности. Традиционные методы сжатия, успешно работающие для двумерного видеоряда, как, например, MPEG-4, уже не справляются с голографическим видеорядом. Причина этого в том, что классическое математическое энтропийное сжатие позволяет сжать видеоряд не более чем на два порядка [2], а для передачи голографического 3D-изображения требуется сжать на пять-шесть порядков. Действительно, плотность записи информации на голограмме ограничивается размером пятна Эйри и для изобразительных голограмм достигает величин порядка 10^6 байт/мм². Такая высокая плотность записи даже для кадра размером А4 при трансляции голографического видео по радиоканалу требует ширины полосы большей, чем весь доступный человечеству радиодиапазон [3]. Один из основателей голографии академик Ю. Н. Денисюк в работе «Достаточно ли известны фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объемного кинематографа и искусственного интеллекта?» [4] и в других материалах прозорливо определил необходимую область исследований по «воспроизведению процесса движения голо-

графических изображений», «разработке методов устранения избыточности информации, т. е. к исключению из голографического изображения той информации, которая не используется при зрительном восприятии», по разработке голографических методов приема и преобразования оптической информации, преобразования голографической информации к виду, удобному для передачи по каналам связи, преобразования информации, необходимого для решения задач голографического кино и телевидения.

2. Компьютерное моделирование

Для преодоления порога энтропийного сжатия голографической информации на два порядка и осуществления эффективного сжатия до пяти-шести порядков была исследована [5] структура цифровых голографических дифракционных решеток (рис. 1 а), синтезированных, как в схеме Лейта – Упатниекса от тестового объекта «ступеньки» (рис. 1 б). Максимальная ширина штриха миры содержит 260 пикселей. Каждый следующий штрих в 1,5 раза уже предыдущего. Всего штрихов 12, последний имеет ширину 2 пикселя.

Из известной формулы голографии (1) видно, что максимумы фотоотклика в плоскости голограммы (x_1, y_1) , определяемые интерференционной картиной $\tau(x_1, y_1)$, в случае линейного фотоотклика, пропорционального суммарной интенсивности $I(x_1, y_1)$ объектной $U(x_1, y_1)$ и опорной $R(x_1, y_1)$ волн, формируют решетки интенсивности с видностью $V_{u,r}(x_1, y_1)$. Здесь $I_o(x_1, y_1)$ и $I_r(x_1, y_1)$ – интенсивности, соответственно, объектного и опорного пучков в плоскости голограммы.

$$\begin{aligned} \tau(x_1, y_1) \square I(x_1, y_1) &= |U_o(x_1, y_1) + R(x_1, y_1)|^2 = \\ &= \{I_o(x_1, y_1) + I_r(x_1, y_1)\} \left\{ 1 + 2 \frac{\sqrt{I_o(x_1, y_1) \cdot I_r(x_1, y_1)}}{I_o(x_1, y_1) + I_r(x_1, y_1)} \cos[\varphi_o(x_1, y_1) - \varphi_r(x_1, y_1)] \right\} = \\ &= I \{1 + V_{u,r}(x_1, y_1) \cdot \cos[\varphi_o(x_1, y_1) - \varphi_r(x_1, y_1)]\} \end{aligned} \quad (1)$$

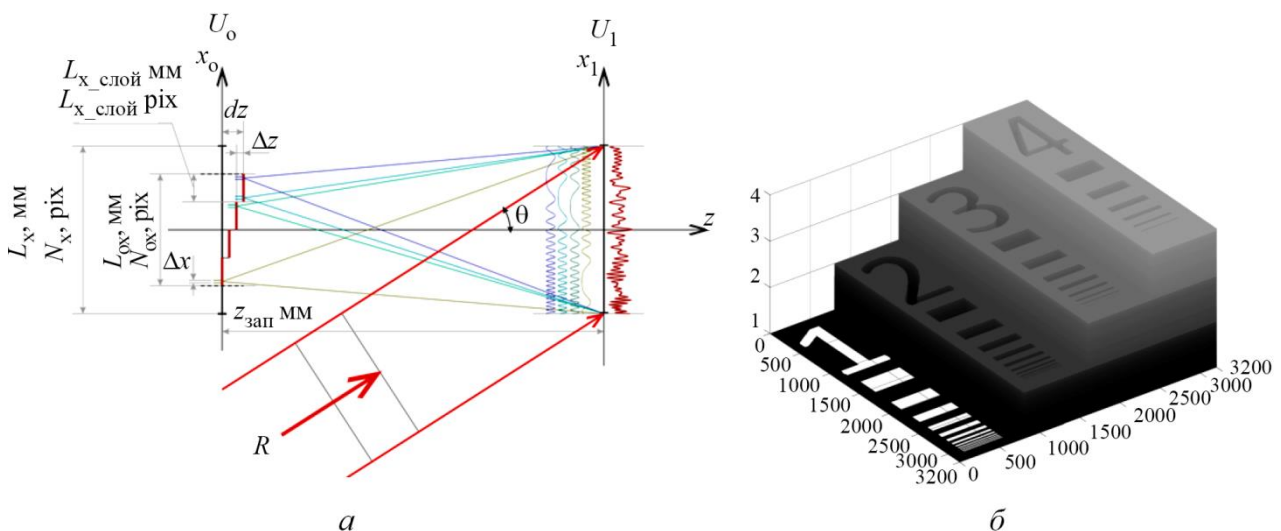


Рис. 1. Схема записи голограммы Лейта – Упатниекса (а); виртуальная 3D-мира «ступеньки» (б)

Интерференционная структура, формируемая разностью фаз объектного φ_o и опорного φ_r пучков, кроме того, еще модулируется изменяющейся по полю голограммы видностью, образуя сложную систему интерференционных полос. Аналитически разбирать полученную

структуру достаточно сложно, и обычно с этого места дальше идет численный анализ волн, дифрагировавших на $\tau(x_1, y_1)$. Однако при более внимательном рассмотрении (1) можно, хотя бы качественно, увидеть, как формируются голографические дифракционные решетки. А именно, из выражения (1) видно, что изменение фазы объектной волны с пространственными частотами ω_x, ω_y имеет высокочастотный характер и модуляция низкочастотными изменениями видности мало влияет на структуру голограммы. Значит, в первом приближении, можно вычислять ω_x, ω_y как производную от изменения фазы опорного пучка φ_r по координатам (x_1, y_1) :

$$\omega_x = \frac{\partial \varphi_r(x_1, y_1)}{\partial x_1} = k \sin \theta_x; \quad \omega_y = \frac{\partial \varphi_r(x_1, y_1)}{\partial y_1} = k \sin \theta_y; \quad (2)$$

здесь ω_x, ω_y – эквивалент известных из радиотехники несущих частот, только они имеют более сложную, пространственную структуру, которая определяется длиной волны когерентного излучения и углом схождения опорного пучка и объектного пучка, не искаженного рассеянием на объекте голографирования.

В свою очередь, на величину несущих пространственных гармоник влияют изменения в плоскости голограммы фазы объектного пучка φ_o . Такое влияние на несущую частоту известно как девиация. В нашем случае это гармоники пространственной девиации Ω_x, Ω_y :

$$\Omega_x = \frac{\partial \varphi_o(x_1, y_1)}{\partial x_1} = k \sin \Delta \theta_x; \quad \Omega_y = \frac{\partial \varphi_o(x_1, y_1)}{\partial y_1} = k \sin \Delta \theta_y; \quad (3)$$

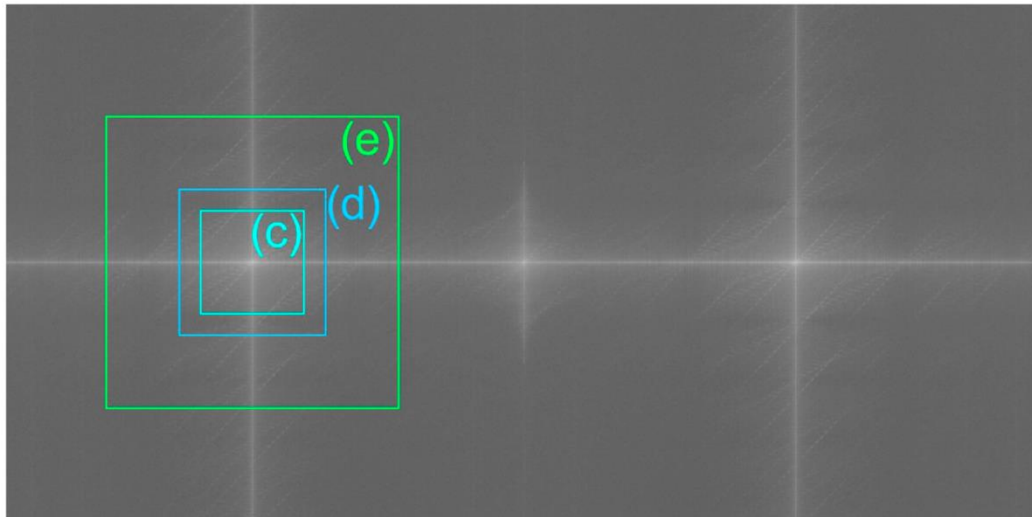
эти частоты локально, по координатам (x_1, y_1) изменяются под действием изменения направлений волн, рассеянных объектом, образуя группу пространственных частот Ω_x, Ω_y в структуре голограммы.

Возникает вопрос, возможно ли разделение этих пространственных гармоник, ведь они имеют разную природу возникновения.

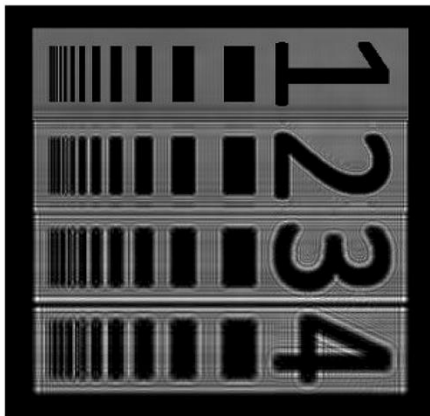
Численный анализ показал, что да, конечно возможно. На рис. 2 а приведено изображение пространственного спектра Фурье голограммы 3D-миры «ступеньки».

Размер используемой виртуальной миры в численном эксперименте был 3200×3200 пикселей, размер голограммы в пикселях был равен $5 \cdot 10^9$, размер секторов с, d, e 3200×3200 составляет приблизительно $10^7, 2 \cdot 10^7$ и $8 \cdot 10^7$ соответственно. Это означает, что на размере квадрата «с» спектра голограммы содержится столько же пикселей, сколько на исходном объекте «3D-мира», на размере квадрата «d» содержится вдвое больше пикселей, а на размере квадрата «e» содержится в восемь раз больше пикселей, т. е. практически на порядок больше.

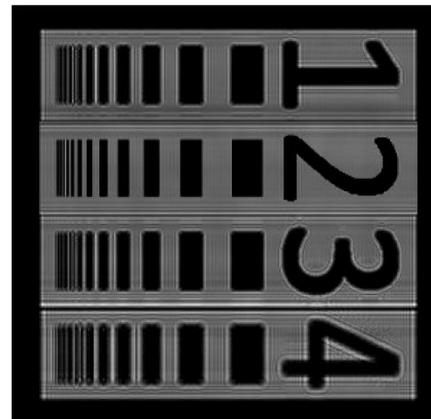
Восстановленные обратным преобразованием Фурье изображения показаны на рис. 2 б–д. Видно, что при выделении –1-го пучка несущая частота исчезает, что было показано еще в работе [6], а восстанавливается изображение, формируемое пространственными частотами объекта голографирования, которые приводили к девиации несущих частот. На рис. 2 б–д видно, что все четыре ступеньки восстанавливаются одинаково, но на разных расстояниях от голограммы. Нерезкие изображения связаны с дифракцией при переходе из одной плоскости изображения объекта в другую. Ясно, что, выбирая размер сегмента (с, d, e) на рис. 2 а, мы регулируем степень сжатия и объем информации, которую необходимо передавать на приемный конец канала связи, и это значительно меньше, чем во всей голограмме.



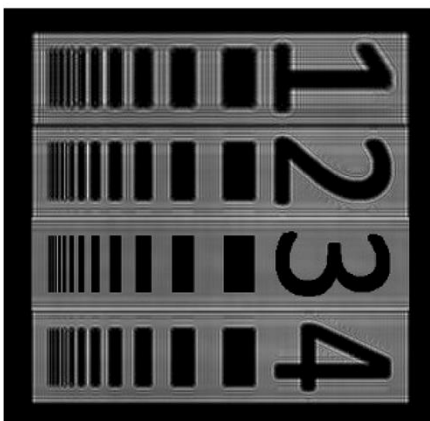
a



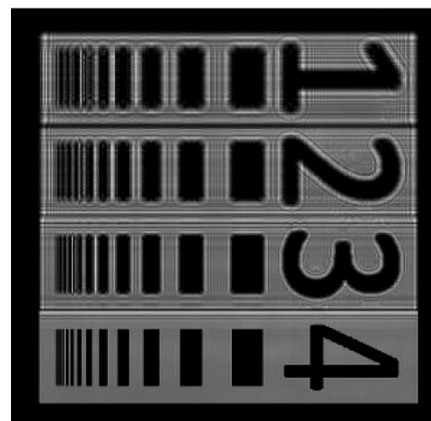
б



в



г



д

Рис. 2. Фурье-спектр голограммы мира «ступеньки» (*a*); восстановление изображения мира в плоскости первой ступеньки (*б*); восстановление изображения мира в плоскости второй ступеньки (*в*); восстановление изображения мира в плоскости третьей ступеньки (*г*); восстановление изображения мира в плоскости четвертой ступеньки (*д*)

На рис. 3 приведены результаты сравнения качества восстановленного участка голограммы изображения второй ступеньки. Результаты восстановления остальных ступенек аналогичны, поэтому не приводятся. Размер мира в пикселях был равен размеру квадрата «с»,

т. е. 3200×3200 , что в 5 раз превышает размер кадра телевидения высокой четкости Full HD (1920×1080). На рис. 3 *a* приведено оригинальное изображение второй ступеньки 3D-мира с горизонталью 3200 пикселей. Штрих № 1 имел ширину 134 пикселя. Каждый следующий был на 30 % уже, так что последний, № 17, был шириной практически в 2 пикселя.

Видно, что при восстановлении сектора (с) голограммы разрешение в восстановленном изображении ограничивается штрихом № 9, что соответствует разрешению, размывающемуся до 16 пикселей. При восстановлении сектора (d) разрешение ограничивается штрихом № 10 мира, или 12 пикселями, а при восстановлении сектора (e) разрешение ограничивается штрихом № 11 мира, или 10 пикселями. Поскольку использованная мира имела разрешение в 1,67 раза больше, чем стандарт Full HD ($3200/1920 \approx 1,67$), то для последнего это будет означать, что разрешение $16/1,67$ чуть меньше 10 пикселей, $12/1,67$ – около 7 пикселей и $10/1,67$ – около 6 пикселей.

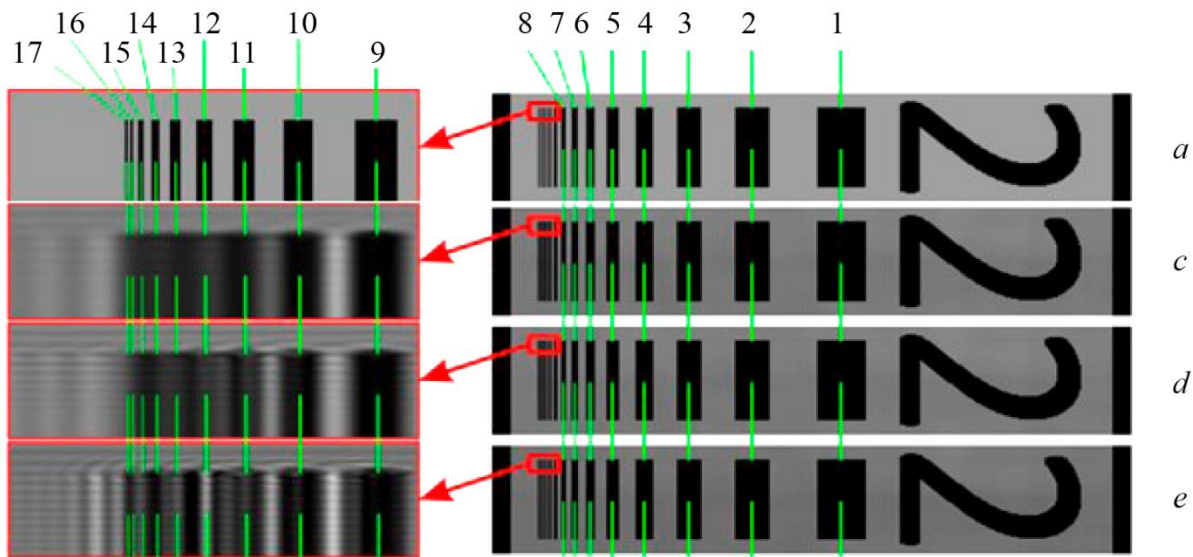


Рис. 3. Изображения вторых ступенек мира, слева – увеличенное изображение локальных участков мира, выделенных красным: (a) – изображение ступеньки оригинальной мира; (c) – изображение ступеньки, восстановленное обратным преобразованием Фурье квадратного сектора размером «с» на голограмме рис. 2 *a*; (d) – изображение ступеньки, восстановленное обратным преобразованием Фурье квадратного сектора размером «d» на голограмме рис. 2 *a*; (e) – изображение ступеньки, восстановленное обратным преобразованием Фурье квадратного сектора размером «e» на голограмме рис. 2 *a*

Это значит, что передача 3D голографической информации с помощью ее пространственного спектра не очень эффективна. При передаче спектра такого же объема информации, который содержит объект голографирования стандарта Full HD, разрешение изображения уменьшается в 10 раз. При передаче спектра с вдвое большей информацией, чем содержит объект голографирования, разрешение восстановленного голограммой изображения падает в 7 раз, а при передаче в 8 раз большей информации разрешение восстановленного изображения падает в 6 раз. Действительно, не утешительный результат. Образно говоря, при передаче спектра голограммы с количеством информации, на порядок (в 8 раз) бóльшим, чем содержит объект голографирования, разрешение в изображении, восстановленном голограммой на приемном конце канала связи, падает почти на порядок (в 6 раз).

Это наталкивает на мысль о том, что на приемный конец канала связи нужно передавать не информацию о голограмме, а информацию об объекте, а голограмму уже синтезировать на приемном конце канала связи, чему и посвящен патент РФ № 2707582 «Способ

дистанционного формирования голографической записи» [7]. В нем использовано представление 3D-изображения как сумма двух изображений – текстуры поверхности и карты высот (рис. 4).

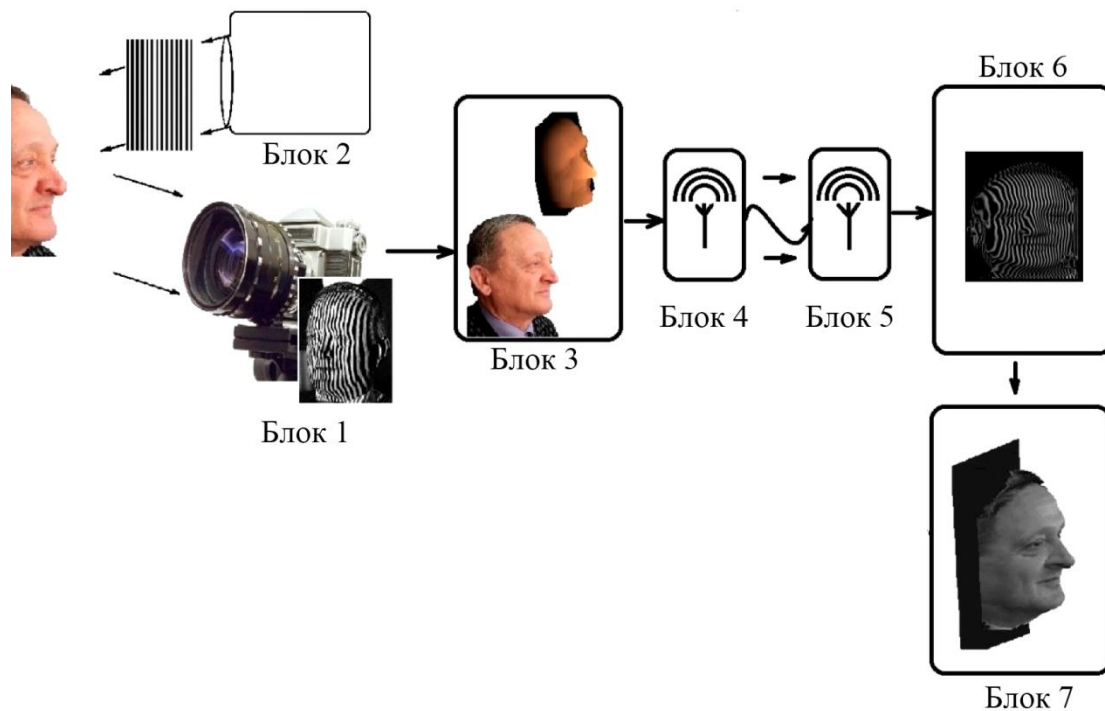


Рис. 4. Схема формирования двух 2D-изображений с информацией о текстуре объекта голографирования и его карте поверхности (маске)

Здесь был использован способ формирования карты высот с помощью латерального освещения голографируемого объекта структурированным светом, состоящим из системы вертикальных полос [8]. Согласно патенту, первый блок представляет собой одну фотокамеру, снимающую в белом свете объект, или две фотокамеры для лучшего исправления окклюзии. В первом блоке создается три 2D-кадра на каждый создаваемый в дальнейшем 3D-кадр. Первый 2D-кадр представляет собой обыкновенную фотографию с любым необходимым фотографическим разрешением или два кадра, подобно стереопаре. Второй и третий кадры регистрируются после проекции на объект голографирования картины латерально падающего структурированного света из параллельных полос.

При этом получается, что количество передаваемой по каналу связи информации лишь ненамного превосходит стандарт Full HD, в котором передается текстура поверхности голографируемого объекта. Следует также отметить, что такой способ регистрации 3D-объекта обладает быстродействием фоторегистрации и пригоден даже для инвазивной регистрации живых, движущихся 3D-объектов *in vivo*, что видно на реальном примере регистрации 3D-изображения человека.

Если первый способ передачи спектра девиации похож на известный в радиотехнике метод передачи на одной боковой полосе, то второй близок к передаче собственных функций 3D-объекта голографирования. При этом разрешение, восстановленное голограммой, синтезированной по такому виртуальному 3D-объекту, существенно выше, что видно на рис. 5, на котором, по сравнению с рис. 3, добавлено изображение второй ступеньки, восстановленное голограммой, синтезированной на приемном конце канала связи.

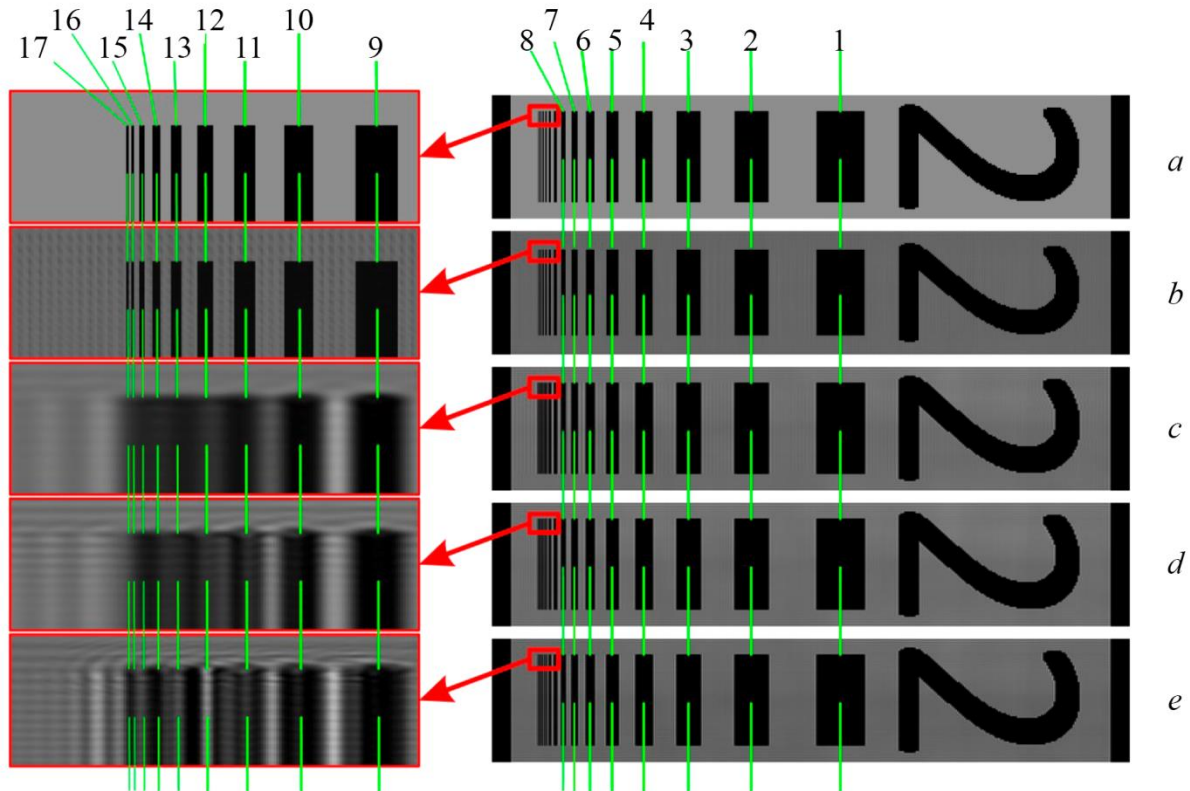


Рис. 5. Изображения вторых ступенек мира аналогичны рис. 3, но с добавлением строки (б), в которой показано разрешение восстановленного изображения голограммой, синтезированной по 3D-изображению объекта голографирования, переданному на приемный конец канала связи двумя модальностями – текстурой и картой глубин

При этом варианте передачи голографической информации по стандартному радиоканалу, осуществленном в работе [9], голограмма восстанавливает полноцветное 3D-изображение высокого качества с пространственным разрешением, как в Full HD, и непрерывным параллаксом (рис. 6).

Кадр № 1 из 291

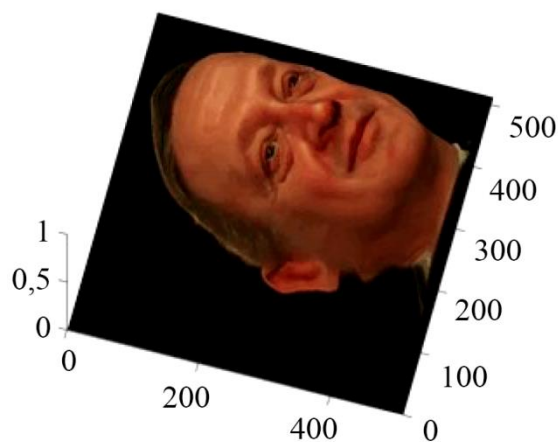


Рис. 6. Один из 291 кадров первого 3D голографического ТВ-видео, переданного по традиционному радиоканалу

3. Заключение

Таким образом, теоретически и численными экспериментами доказано, что предложенный в работе [8] метод передачи голографической информации путем двух модальностей объекта (маска+текстура) и синтез голограммы на приемном конце канала связи позволяют восстанавливать 3D-изображение с более высоким пространственным разрешением, чем при спектральной селекции -1 -го порядка дифракции. Трудно переоценить значимость полученных результатов для решения проблем голографического ТВ и 3D дополненной реальности [9] и конкретно в задачах дистанционной хирургии, при работе в агрессивных средах, под водой, в космосе и в ряде специальных задач. Первое голографическое видео из 291 3D-кадра, переданное по стандартному радиоканалу, основанное на изложенных в работе [8] принципах, было показано на международной конференции HoloExpo 2023 и XXXII школе голографии в Санкт-Петербурге.

Литература

1. Локощенко А. М., Фомин Л. В. Моделирование процессов взаимодействия агрессивной среды с материалами и элементами конструкций // Научное обозрение. Реферативный журнал. – 2018. – № 1. – С. 11–24. – URL: <https://abstract.science-review.ru/ru/article/view?id=1856>
2. 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 – Society of Motion Picture and Television Engineers (SMPTE), 2011
3. Титарь В. П., Богданова Т. В. Проблемы создания голографической телевизионной системы // Радиоэлектроника и информатика. – 1999. – № 2 (7). – С. 38–42.
4. Денисюк Ю. Н. Достаточно ли известны фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объемного кинематографа и искусственного интеллекта? // Журнал технической физики. – 1991. – Т. 61 (8). – С. 149–161.
5. Shoidin S. A., Puzov A. L. Compressing 3D holographic information similar to data transmission via a single sideband // Journal of Optical Technology. – 2022. – Vol. 89 (3). – P. 176–182. – DOI: 10.1364/JOT.89.000176.
6. Takeda M. Fourier fringe analysis and its application to metrology of extreme physical phenomena: a review (invited) // Applied Optics. – 2013. – Vol. 52 (1). – P. 20–29. – DOI: 10.1364/AO.52.000020.
7. Патент RU2707582C1 Рос. Федерация. Способ дистанционного формирования голографической записи : № 2018124440 : заявл. 03.07.2018 : опубл. 28.11.2019 / Шойдин С. А. – 19 с.
8. Shoidin S. A., Puzov A. L. Remote formation of holographic record // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2021. – Vol. 57 (1). – P. 80–88. – DOI: 10.3103/S8756699021010118.
9. 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. – №. 23 (1). – С. 21–27. – DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-21-27.