

ВЛИЯНИЕ АБЕРРАЦИЙ ОПТИКИ НА ПЛОТНОСТЬ ЗАПИСИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Сергей Александрович Шойдин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат физико-математических наук, доцент, тел. (383)291-00-92, e-mail: shoydin@ssga.ru

Анализируются проблемы голографической записи информации. Традиционно развивавшиеся системы памяти были нацелены на хранение «холодных данных» – оцифрованных массивов длительного хранения при редких к ним обращениях. При записи для этих целей аналоговых голограмм существенную роль играют aberrации оптики. Анализируется влияние aberrаций как в схемах записи двоичной информации, так и в схемах записи изображений. Полученные оценки плотности записи информации даже с понижающим коэффициентом, определяемым aberrациями, указывают на невозможность передачи таких голограмм по радиоканалу. Для решения задачи передачи голографической информации по радиоканалу в устройствах дополненной реальности и голографического телевидения предложено использовать метод кодирования близкий к известному в радиодиапазоне методу передачи информации на одной боковой полосе, выраженному в передаче двух массивов, эквивалентных по объёму обычному TV и синтезу по ним голограммы на приёмном конце канала связи.

Ключевые слова: лазер, голография, интерференция, информация.

INFLUENCE OF ABERRATIONS OF OPTICS ON DENSITY OF RECORDING OF HOLOGRAPHIC INFORMATION

Sergey A. Shoydin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, phone: (383)291-00-92, e-mail: shoydin@ssga.ru

The problems of holographic recording of information are analyzed. Traditionally developed memory systems were aimed at storing “cold data” – digitized arrays of long-term storage with rare accesses to them. When recording analog holograms for these purposes, an essential role is played by optical aberrations. The influence of aberrations is analyzed both in binary information recording and image recording schemes. The obtained estimates of the recording density of information even with a decreasing coefficient determined by aberrations indicate the impossibility of transmitting such holograms over the radio channel. To solve the problem of transmitting holographic information over a radio channel in augmented reality and holographic television devices, it is proposed to use a coding method close to the method of transmitting information on one side band, which is known in the radio range, expressed in the transfer of two arrays equivalent in volume to a conventional TV channel and the synthesis of holograms on the receiving end of a channel.

Keywords: laser, holography, interference, information.

Введение

Традиционно развивавшиеся голографические системы хранения информации, так называемые голографические запоминающие устройства (ГЗУ) были

нацелены на хранение «холодных данных» – оцифрованных массивов длительного хранения при редких к ним обращениях [1-7]. Для задач дополненной реальности и голографического телевидения требуется оперативная запись и хранение массивов голографической информации с постоянными многократными к ним обращениями. Причём, с одной стороны в виде 3D изображений, воспринимаемых оператором как аналоговые сигналы, с другой – как оцифрованные для передачи информации по каналам связи [8]. Простейшие оценки плотности записи информации в голограммах проводились для апертурно-мультиплицированных матриц Фурье-голограмм [2, 3]. В работах того периода уделялось внимание не только исследованию свойств самой голограммы, но и качеству оптической системы, участвующей как в записи голографической информации, так и в её воспроизведении [9, 10]. Однако оптимальные характеристики оптических систем дополненной реальности всё же требуют уточнения, а хранение и передача массивов изображительных голограмм – корректировки оценки, количества содержащейся в таких голограммах информации и её взаимодействия с оптическими системами, как на этапе формирования голограмм, так и на этапе их восстановления.

Согласование оптической системы с матрицей голограмм (включая голографическое киноформное кино)

Традиционная схема голографической памяти состоит из устройств записи и воспроизведения апертурно-мультиплицированных голограмм Фурье. Принципиальные оптические схемы, которых показаны на рис. 1 *а, б*. В этих схемах запись информации производится в матрицы Фурье-голограмм.

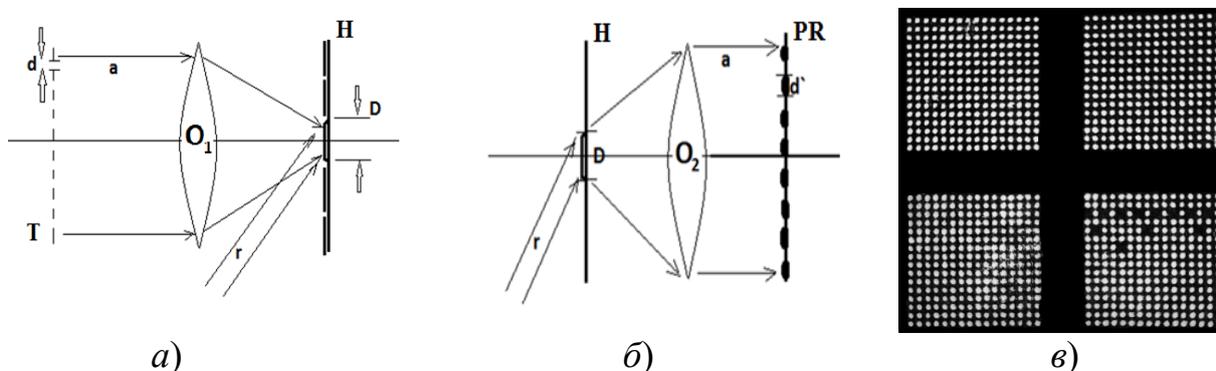
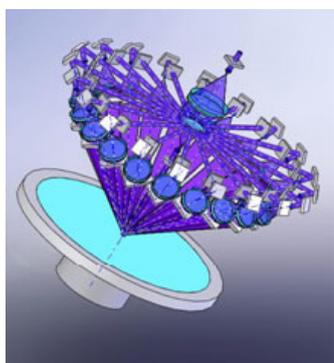


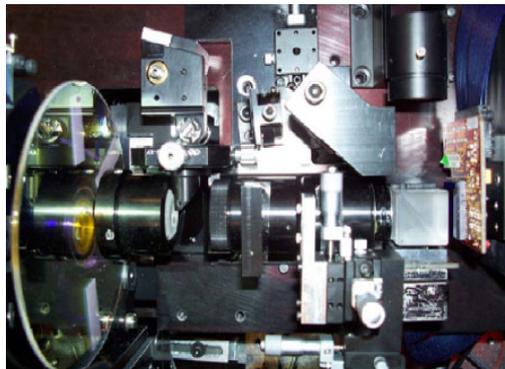
Рис. 1. Принципиальная схема записи и восстановления апертурно-мультиплицированных Фурье-голограмм:

а) схема записи в ГЗУ, где транспарант Т, площадью S_t с бинарными ячейками, размером d , формирует Фурье объективом O_1 объектный пучок с перетяжкой D , записываемый с помощью опорного пучка на каждую отдельную Фурье голограмму в плоскости фотоносителя Н; *б)* схема восстановления матрицы голограмм Н в ГЗУ, где опорным пучком r с каждой голограммы на фотоприёмную матрицу PR восстанавливается Фурье-объективом изображение транспаранта Т с размером ячейки d' , увеличенное по сравнению с d пропорционально отношению фокусов записывающего и восстанавливающего объективов O_2/O_1 ; *в)* матрица восстановленных изображений ячеек информационного транспаранта, записанных в одной из апертурно-мультиплицированных голограмм

Реально создаваемые в рамках таких проектов оптико-механические системы очень сложны (рис. 2) и в них на первое место по ограничениям ёмкости выходят абберационные характеристики.



а)



б)

Рис. 2. а) макет 20-ти канального устройства записи бинарной информации матрицами Фурье-голограмм, разрабатываемого НИИ Радиотехники МГТУ им. Баумана; б) устройство записи бинарной информации матрицами Фурье-голограмм, представленное в 2010 г. компанией InPhase Technologies

При наличии высокоразрешающего голографического материала, разрешающая способность которого существенно превосходит все пространственные частоты интерференционной картины, образуемой взаимодействием объектного и опорного пучков, определяющим ограничением становятся абберации оптических систем записи и восстановления. В работах [9, 10] показано, что их влияние на плотность записи n выражается через уширение диаметра пятна рассеяния, сформированного объектным и опорным пучками (1), а также к уширению импульсного отклика системы воспроизведения информационной матрицы.

$$n = \left(\frac{\Omega}{\lambda}\right)^2 \left[C^2 A_1^2 \left(1 + \sqrt{1 + 2 \frac{\Theta C_1}{A_1^2}} \right)^2 A_2^2 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\Theta \beta^2}{16} + \frac{\Theta}{A_2^2}} \right)^2 \right]^{-1}. \quad (1)$$

Здесь $A_1 = \delta_1 / l_h$ и $A_2 = \delta_2 \pi l_h / \lambda f$ относительные абберации записывающей и восстанавливающей оптической системы, δ_1 – лучевые абберации записывающего Фурье-объектива, δ_2 – восстанавливающего, Ω – относительное отверстие записывающего объектива, l_h – размер голограммы, λ – длина волны записи, $C = \varepsilon / \pi(\varepsilon^2 + 1)$, $C_1 = (\varepsilon^2 + 2)^2 (\varepsilon^2 + 1) / (2\varepsilon)^4$, ε – отношение диаметров опорного и объектного гауссовых пучков, Θ – выраженное в децибелах отношение сигнал-перекрестный шум восстановленного изображения (рис. 1, в). В рамках предложенной модели оптимально подобранные абберации записывающей и восстанавливающей оптической системы влияют (2) на плотность записи информации n как среднее геометрическое лучевых аббераций (3).

$$n = \left(\frac{\Omega}{\lambda}\right)^2 \left[CM^4 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\theta(2C_1)^{\frac{1}{2}}}{M^2}} \right)^4 \right]^{-1}, \quad (2)$$

$$M = (A_1 A_2)^{1/2} = (\pi \delta_1 \delta_2 / \lambda f)^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Таким образом, лучевые aberrации приводят к смещению позиционирования микроголограмм, увеличивая перекрёстный шум от соседних, и к смещению положения изображения отдельных ячеек, что также увеличивает перекрёстный шум на фотоприёмнике. Ограничивая перекрёстный шум для сохранения работоспособности устройства, в реально создаваемых схемах (рис. 2) требуется учитывать не только собственно лучевые aberrации, но и точность позиционирования изображений, влияющую на величину перекрёстных шумов [11]. Следовательно, каждая из величин δ_1 и δ_2 представляется суммой собственно лучевых aberrаций и допусков в работе систем записи и восстановления, в своём роде обобщённых aberrаций, что является одним из главных ограничений плотности записи бинарной информации.

Дальнейшие попытки увеличить плотность записи в ГЗУ развивались по пути поисков путей наложения нескольких голограмм в одном участке голографической среды, назовём их амплитудно-мультиплицированными. Это осуществляется с использованием объёмных голографических сред совмещением записи одной голограммы с другой при изменении наклона опорного пучка. При этом осуществляется уход из угла объёмной голограммы [12]. Также можно осуществлять наложение голограмм, кодируя опорные пучки так, чтобы функция их корреляции в рамках одного участка голографической среды была минимальна [6]. Такой режим записи голограмм предполагает повышенные требования к величине динамического диапазона фотоотклика голографического материала пропорционально квадрату числа наложенных голограмм [13] и вследствие этого, его быстрому исчерпанию. При этом ограничения на плотность записи информации, вызванные aberrациями (1, 2) остаются прежними.

К числу амплитудно-мультиплицированных матриц Фурье-голограмм можно отнести и схемы записи информации, с записью нескольких голограмм в один участок голографической среды. Наложение голограмм происходит либо за счёт изменения условий Брэгга [5], либо за счёт кодирования опорных пучков [6, 7]. На рис. 3 показана принципиальная схема записи бинарной информации в матрицы голограмм, выполненных в объёмном материале «Реоксан», при кодировании опорного пучка матричным транспарантом, аналогичным используемому в объектном пучке.

В этой схеме голограммы записываются при одновременном смещении по апертуре 5 на величину ширины функции корреляции опорного пучка при изменении его структуры кодированием транспаранта 3 с фазовой маской 4. При этом достигается эффективное использование динамического диапазона фотоот-

клика голографического материала и упрощается оптическая схема, поскольку роль опорного пучка может играть часть объектного. Причём эта часть совсем не обязательно должна быть пространственно выделенной, как показано на рис. 3, а в принципе может быть сформирована из любых локальных участков транспаранта 4. В этой схеме, как и в классической [9–11], Фурье-образ объектного пучка в плоскости голограмм близок по форме к гауссову пучку и поэтому, накладываясь со смещением, формирует более равномерную засветку фотоматериала, известную как «супергаусс» [14] и, следовательно, осуществляет более полное использование его динамического диапазона при формировании наложенных голограмм. Существенным отличием такой записи можно считать отсутствие необходимости пространственного разнесения голограмм на расстояния, определяемые обобщёнными aberrациями записывающей системы. При отсутствии ограничений, связанных с исчерпанием динамического диапазона голографического материала, обобщённое влияние дифракционного и aberrационного размытия объектного пучка записывающей системы следует заменить на ширину функции автокорреляции кодированного опорного пучка.

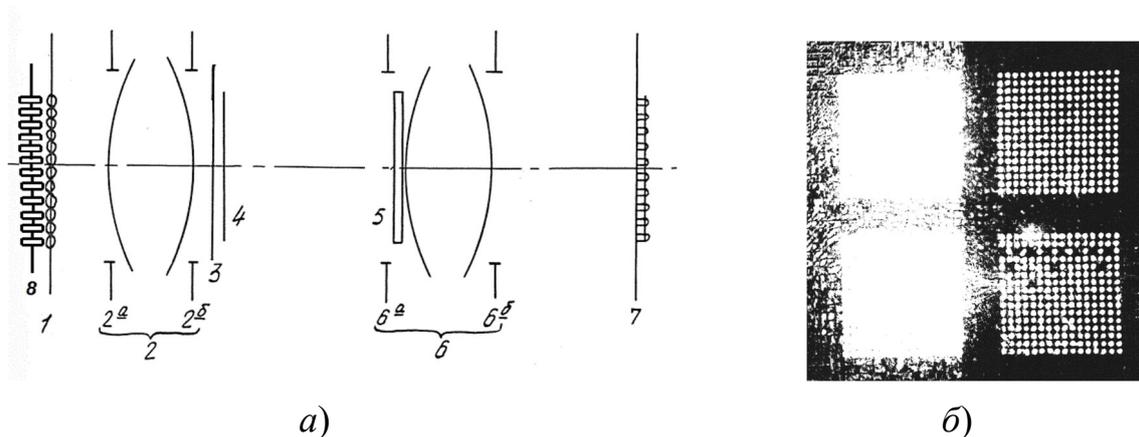


Рис. 3. Безопорное ГЗУ:

а) принципиальная схема: 1 – линзовый растр; 2а, б – компоненты первого Фурье-объектива; ба, б – компоненты второго Фурье-объектива; 3 – информационный управляемый транспарант с наложенной случайной фазовой маской; 4, 5 – матрица голограмм; 7 – фотоприёмная матрица; 8 – матрица полупроводниковых лазеров; б) восстановленное в «безопорном» ГЗУ изображение информационной матрицы, состоящее из 4-х субматриц по форме фотоприёмной матрицы, на которой видны участки, подвергшиеся большим, или меньшим aberrационным искажениям, включая как aberrации оптики, так и самих голограмм. Две левых субматрицы формируют восстанавливающий пучок, две правых – восстановленный

На практике влияют оба этих фактора, поэтому расчёт их взаимного влияния довольно сложен, но в [6] приводятся данные о том, что экспериментально было достигнуто частичное наложение голограмм, расстояние между которыми по каждой из двух перпендикулярных осей в плоскости голограмм равнялось примерно 1/3 от дифракционно-aberrационного размытия. Это увеличивало плот-

ность записи бинарной информации (n') примерно на порядок и может учитываться простым коэффициентом сжатия K в (1, 2).

$$n' = Kn. \quad (4)$$

Близкой к описанным выше схемам записи бинарной голографической информации может считаться система Holotape [15, 16] – схема записи строки Фурье изобразительных голограмм. В ней также плотность записи ограничивается разрешающей способностью плёнки и перекрёстными шумами ленты с тиснёнными Фурье-голограммами (рис. 4).

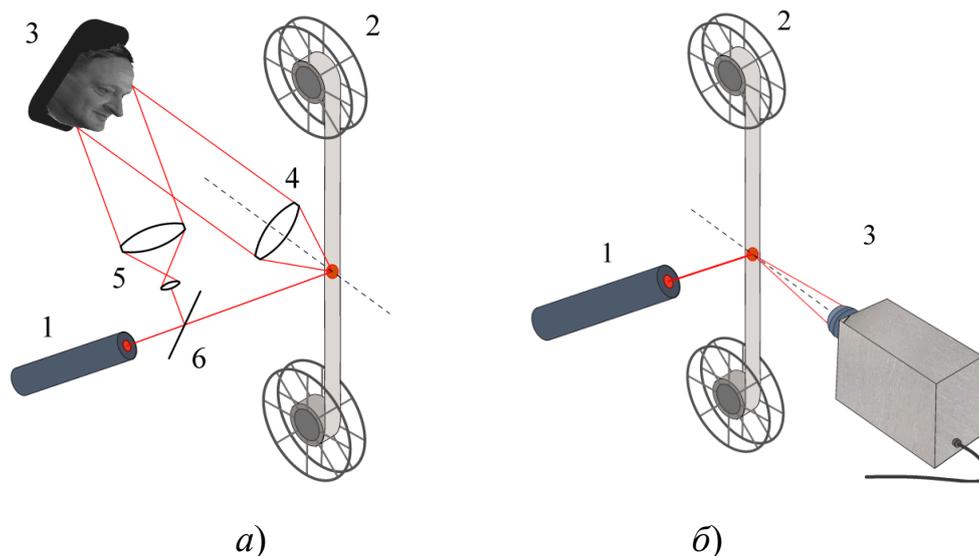


Рис. 4. Проигрыватель тиснённых фильмов:

a) система записи (1 – лазер, 2 – лента голографического материала, 3 – объект голографирования, 4 – Фурье-объектив, 5, 6 – система подсветки объекта; *б)* система воспроизведения тиснённых фазовых голограмм, 1 – лазер, 2 – лента Фурье-голограмм, 3 – приёмная камера

В таких системах плотность записи ограничивается aberrациями оптической схемы записи, ограничивающей плотность расположения этих Фурье голограмм [9, 10], размывающих поле, занимаемое каждой из Фурье голограмм и может быть увеличена за счёт частичного наложения, аналогично [5–6]. Схема Holotape, предложенная В. Дж. Ханнаном ещё в 1973 году, представляет собой запись линейки Фурье-голограмм на ленту и имеет несомненное преимущество перед существующим кинематографом, заключающееся в отсутствии необходимости создавать грейферный механизм передёргивания кадров. Это происходит в силу известного свойства Фурье-голограмм, когда при их смещении поперёк оптической оси положение восстановленного изображения не меняет своих координат, а изменяется только фаза восстановленного изображения. Представляется, что эта схема имеет свои преимущества перед разработанной в НИКФИ первой в мире системой голографического кино [17]. Перекрёстные шумы от со-

седних голограмм здесь также присутствуют, создавая фон, на который накладывается полезное изображение. Они могут быть учтены согласно (1). В восстановленном изображении лучевые аберрации в целом приводят к снижению разрешающей способности, размывая его «пиксели» до размеров абберационного пятна, однако зрительное восприятие отличается от восприятия матрицей фотоприёмников. При зрительном восприятии ряд аберраций компенсируется адаптацией зрения человека к некоторым видам искажений. Например, дисторсия вполне приемлема в небольших размерах и не влияет на распознавание показываемого объекта, а кома приводит к снижению разрешающей способности в восстановленном изображении, что по (1, 3) приводит к снижению плотности записи информации. С учётом этого в качестве δ_2 нужно учитывать уже не все виды аберраций, а исключать из них дисторсию, а иногда и сферохроматическую аберрацию, которые не приводят к размыванию точки изображения. Следует отметить, что в отличие от бинарных изображений, для которых были выведены формулы (1–3), для оценки количества информации в аналоговых изображениях следует учесть ещё и то, что запись изображений происходит в полутоновом режиме.

Информационная ёмкость изображительных голограмм

Действительно, оценка количества передаваемой по каналу связи информации для 3D дополненной реальности, или голографического телевидения может быть произведена на основе формулы Шеннона для канала с шумами [18]:

$$N = WT \cdot \log_2(1 + I_c / I_{ш}). \quad (4)$$

Здесь, W – диапазон передаваемых по каналу частот, T – время передачи, $I_c/I_{ш}$ – отношение сигнал-шум. В наших обозначениях W соответствует пространственным частотам в двух ортогональных координатах, T – двумерной протяжённости сигнала (площади голограммы) и $\log(1+I_c/I_{ш}) = \theta$ при больших значениях $I_c/I_{ш}$, соответствующих реальным изображениям, приближенным к телевизионному качеству. Перепиывая (4) в наших обозначениях и учитывая, что Ω/λ в (1, 3) имеет смысл пространственных частот W , и, учитывая, что в нашем случае эти частоты на плоскости, т. е. в двумерном пространстве, получаем выражение для оценки количества информации в одном кадре с учётом плотности записи n .

$$N = Sn\theta = S \left(\frac{\Omega}{\lambda}\right)^2 \cdot \theta \left[CM^4 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\theta(2C_1)^{\frac{1}{2}}}{M^2}} \right)^4 \right]^{-1}. \quad (5)$$

Используя (5) можно вычислить количество информации в одном кадре системы Holotape, однако, далее для простоты изложения возьмём случай, когда $M \ll 1$, т. е. δ_1 и $\delta_2 \ll (\lambda f/\pi)^{1/2}$. В этом случае (5) вырождается в (6).

$$N = Sn\theta = S \left(\frac{\Omega}{\lambda}\right)^2 / 2CC_1\theta, \quad (6)$$

которое при $\varepsilon=1$ принимает простой (7) вид:

$$N = Sn\theta = S \left(\frac{2\pi\Omega}{\lambda}\right)^2 / (2,25 \cdot \theta). \quad (7)$$

Плотность записи информации по (6, 7) ожидаемо падает пропорционально θ – числу различимых градаций яркости, выраженном в децибелах. При значениях $\Omega = 1/2\pi$ и $\theta = 8$, что соответствует реальным значениям записывающей системы и широко используемому отношению сигнал/шум – 256, достижимая плотность записи на единицу площади носителя будет равна одному биту на площадь λ^2 , увеличенную пропорционально логарифму требуемого в восстановленном изображении отношения сигнал/шум.

Также, используя (3) можно определить абберационные ограничения на оптику воспроизведения, которая должна широко тиражироваться и быть доступной по сложности и цене для успеха проекта Holotape. Полагая $M = 0,1$, что соответствует приближению при выводе (6), можно получить из (3):

$$\delta_1\delta_2 = \frac{0,01}{\pi} \lambda f. \quad (7)$$

Откуда для типовых аббераций проекционного объектива $\delta_1 = 0,02$ мм получаем для $\lambda = 6,28$ мкм и $f = 3$ м, допустимые абберации системы воспроизведения $\delta_2 = 0,22$ мм. Такие абберационные искажения примерно соответствуют размеру одной LED ячейки современного телевизора, что означает, что система Holotape может быть вполне работоспособной по своим техническим характеристикам как в области телевидения, так и в устройствах дополненной реальности.

Как видим, абберации оптических систем заметно снижают плотность записи информации в голограммах (1, 5). Однако, несмотря на это, в задачах передачи голографической информации по каналам связи возникают такие большие массивы информации, которые не могут передаваться в реальном времени. Действительно, изобразительные голограммы, несущие 3D изображения должны содержать как минимум на порядок большие массивы информации, чем в ГЗУ, поскольку в них кодируются не бинарные массивы данных, а полутонные с количеством градаций, не менее принятых в высококачественном телевидении или фотографии.

Простейшие оценки по (2) при сравнительно небольших абберациях $\delta_1 = \delta_2 = (\lambda f/\pi)^{1/2}$, $\varepsilon = 1$ и $\theta = 8$ дают оценку плотности записи информации в $n = (\Omega/4\lambda)^2$, что для $\lambda=0,63$ мкм и $\Omega=1$ соответствует $n=1,5 \cdot 10^5$ бит/мм² и $n' = 1,5 \cdot 10^6$ бит/мм². Поэтому для передачи даже бинарных изображений размером с портрет человека в натуральную величину $S = (300-400)$ мм² необходимо передавать с телевизионной частотой кадров (25 Гц) не менее $25nS = 419$ Гбит/с. Это превышает возможности всех радио- и телеканалов вместе взятых, хотя в вышеприведённой оценке ещё отсутствует, добавленный в (5) множитель $\theta=8$, увеличивающий плотность записи ещё почти на порядок.

Возникающая проблема заключается в том, что высокая плотность голографической записи информации (1, 5) входит в конфликт с возможностями известных каналов передачи информации [19].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что для передачи голографической 3D информации на расстояние по традиционным радиоканалам требуется решение задачи по её эффективному сжатию, как, например, предлагается в патенте РФ № 2707582 [21].

Сжатие голографической информации при её передаче по каналам связи

Голографическая запись информации происходит на несущей пространственной частоте, образуемой интерференцией сходящихся под углом когерентных объектной $U_1(x_1, y_1)$ и опорной $R_3(x_1, y_1)$ волнами (рис. 5). Формируемое объектом голографирования излучение $U_1(x_1, y_1)$ осуществляет амплитудно-фазовую модуляцию несущей частоты.

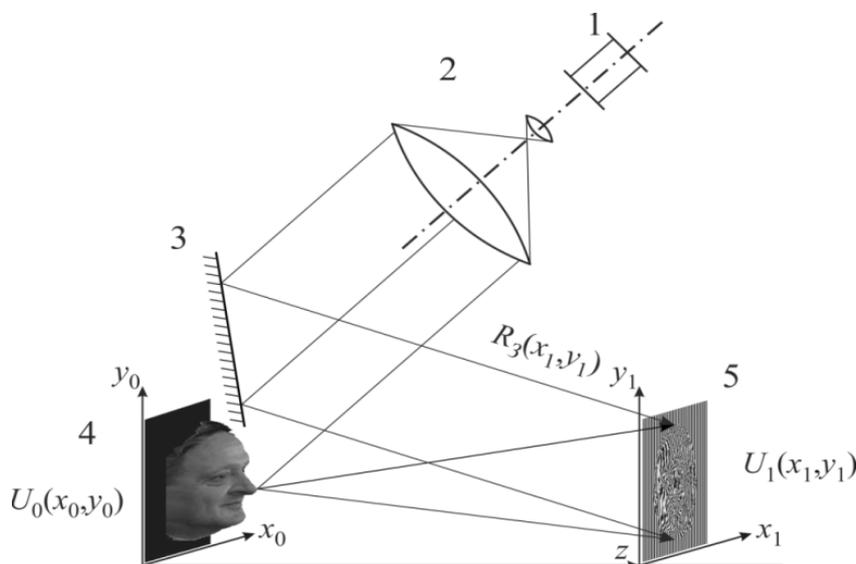


Рис. 5. Обобщённая схема записи пропускающей голограммы:

1 – лазер, 2 – коллимирующая система, 3 – зеркало, 4 – объект голографирования, 5 – фотоматериал, на котором регистрируется интерференционная картина, образуя голограмму

Поскольку в предложенной схеме голографирования отсутствуют оптические системы переноса изображения (объективы), их aberrации не могут влиять на записываемую голограмму и в этом случае для оценок плотности записи необходимо использовать выражение (6), в которое вырождается (5) при $M \rightarrow 0$, но в нём пространственные частоты объекта голографирования $2\pi\Omega/\lambda$ следует заменить на $2\pi\omega/\lambda$, где ω – угол схождения объектного и опорного пучков.

Высокая плотность записи информации, в первую очередь, определяется возможностью записи на голограмму сигналов с высокой пространственной ча-

стотой ω . Известные голографические материалы [20] могут записывать сигналы до 10^4 лин./мм. Такие частоты излучением видимого диапазона можно создавать только во встречных пучках. В схемах записи пропускающих голограмм максимальная частота может быть оценена для случая интерференции объектного и опорного пучков, созданных HeNe лазером с линией излучения в видимом спектре $\lambda=0,633$ мкм. Для типичного угла схождения пучков $\alpha \approx 30^\circ$ получается несущая частота около $\omega=1/\lambda=1,6 \cdot 10^3$ лин./мм. Модуляция этой пространственной частоты происходит на частоте огибающей, сформированной излучением объектного пучка Ω . Часто Ω может не сильно отличаться от ω (рис. 3). Но всегда ли это нужно? Какие пространственные частоты реально содержат передаваемое изображение? Какие пространственные частоты формируют текстуру поверхности голографируемого 3D объекта? Какие пространственные частоты формируют форму 3D поверхности голографируемого объекта? Исследование этих вопросов, как будет показано ниже, даёт ответ на возможность передачи голографического 3D изображения на расстояние со сжатием, достаточным для его передачи по обычным радиоканалам. Размытие изображения, аналогичное аберрациям, здесь проявляется только в дискретизации сигнала, проявляющееся в цифровом блоке формирования голограмм.

В патенте [21] предложено разделить информацию о 3D объекте на топографическую карту и текстуру этой поверхности. Требуемая точность передачи этих двух изображений совсем не требует высокой разрешающей способности. Для изображения стандарта FullHD и 4K достаточно передавать (1920×1080) и (4096×3072) точек на кадр соответственно. Известно, что такое разрешение позволяет формировать с очень хорошим качеством изображения на экранах с диагональю, превышающей два метра. Стандартная голограмма такого размера, согласно (1, 3), может нести до $1,5 \cdot 10^5$ [бит/мм²] $\cdot \theta \cdot (1,6 \text{ м} \cdot 1,2 \text{ м}) = 2,88 \cdot 10^9$ [Кб]. А реально в TV кадре 4K, даже с учётом 3-х цветов, содержится только $4096 \times 3072 = 3,7 \times 10^7$ [Кб], что на два порядка меньше.

Передавая поточечно информацию о голограмме, мы передаём и гармоники несущей и гармоники модуляции. Если следовать патенту [21], то можно передавать отдельно гармоники, отвечающие за модуляцию несущей без неё самой, что напоминает передачу радиосигнала на одной боковой полосе. Это осуществляется путём передачи двух кадров стандартного размера, один из которых передаёт информацию о текстуре поверхности 3D объекта (рис. 6, а), а другой – его топографию (рис. 6, б).

В этом случае количество передаваемой информации существенно уменьшается, но необходимо заранее сообщить на приёмный конец канала связи о величине несущей гармоники, что в нашем случае соответствует сообщению о длине волны и угле дифракции. Получив эту информацию на приёмном конце по математической модели, соответствующей схеме рис. 5 строится математическая модель 3D объекта голографирования и по ней математическая модель голограммы. Будучи выведенной на материальный носитель и освещённая излучением с заданными длиной волны при заданном угле восстановления такая голограмма будет восстанавливать 3D голографическое изображение. При этом вы-

игрыш при передаче информации составит несколько порядков, как это показано выше. В отсутствие оптики записи голограмм формулы (1, 3) теряют свой прямой смысл, а допустимые значения размытия изображений могут оцениваться так же, как приведённые выше допуски на aberrации для системы Holotape, и δ_1 здесь будет характеризоваться точностью дискретной записи голограмм, а δ_2 допусками, предъявляемыми к качеству восстановленного изображения ($\delta_1=0,02$; $\delta_2=0,22$).

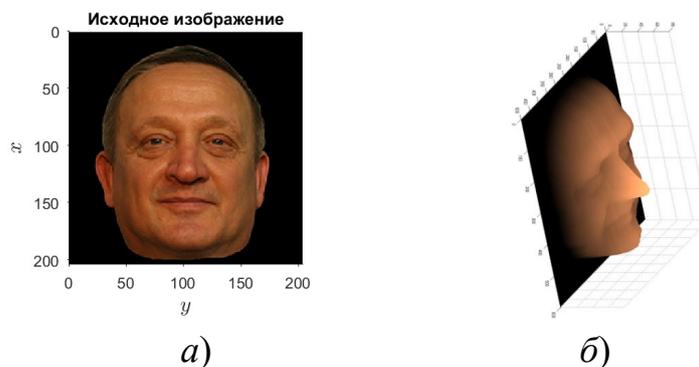


Рис. 6. Представление 3D объекта:

а) текстура поверхности, б) топографическая карта поверхности

Заключение

На основе приведённых расчётов можно сделать вывод, что даже с учётом снижения плотности записи в голограммах за счёт aberrаций записывающей и восстанавливающей оптики количество её в типичной голограмме таково, что передавать её по традиционным радиоканалам невозможно не заполнив весь известный радиодиапазон. Это верно не только для случая традиционных бинарных сигналов, какие используются в голографических запоминающих устройствах, но и для случая передачи полутонных голографических изображений. Предложенный метод передачи голографических 3D изображений в реальном времени, возможен, без недопустимых потерь качества изображений за счёт снижения избыточности в передающем канале за счёт исключения несущей частоты, что эквивалентно известному в радиосвязи методу передачи информации на одной боковой полосе. Предложенный для этого метод, описанный в [21] показывает на реализуемость данного метода путём передачи двух матриц изображений, одна из которых представляет собой фотографию текстуры поверхности 3D объекта, а вторая – топографическую карту его поверхности. Оценка допустимых aberrаций при этом сводится к точности позиционирования системы синтеза голограмм с одной стороны и требований к качеству восстановленного 3D изображения с другой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денисюк Ю. Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // Доклады Академии наук СССР. – 1962. – Том 144. – № 6. – С. 1275-1278.

2. Van Heerden P.J. A New Optical Method of Storing and Retrieving Information // *Appl. Opt.* – 1963. – vol. 2.– № 4. – P. 387-392.
3. Hill B. Some Aspects of a Zage Capacity Holographic Memory // *Appl. Opt.* – 1972. – vol.11. – № 1. – P. 182–196.
4. Гибин И. С., Мантуш Т. Н., Нестерихин Ю. Е., Панков Б. Н., Пен Е. Ф., Твердохлеб П. Е. Программируемое голограммное ЗУ с записью и считыванием информации // *Автометрия.* – 1975. – №3. – С. 3-11.
5. Соскин С.И., Шойдин С.А., Левин В. И. Голографическое запоминающее устройство. Авторское свидетельство № 701350, 1979 г., зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР за № 2468584 от 01.04.1977 г.
6. Shoydin S. A. Holographic Memory Without Reference Beam // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics).* – 2016. – vol. 25. – № 4. – P. 262-267. – ISSN 1060-992X.
7. Betin A. Yu., V. I. Bobrinev, S. S. Donchenko, S. B. Odinkov, N. N. Evtikhiev, R. S. Starikov, S. N. Starikov, E. Yu. Zlokazov. Holographic memory optical system based on computer-generated Fourier holograms // *Applied Optics.* – 2013. – Vol. 52. – № 33. – P. 8142–8145.
8. Шойдин С. А., Пазоев А. Л. Проблемы цифрового синтеза голограмм: на примере вычисления преобразования Френеля и структуры голограммы прозрачной призмы // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 8 : Национальн. конф. с междунар. участ. «СибОптика-2019».* – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – С. 149–159. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-8-149-159.
9. Соскин С. И., Шойдин С. А. Расчет оптической схемы голографического запоминающего устройства / *Опт. и спектр.* – 1978. – Т. 44. – № 3, С. 566-573.
10. Соскин С. И. Шойдин С. А. Оптимизация параметров голографического запоминающего устройства с учетом аберраций / *Опт. и спектр.* – 1978. – Т. 44. – № 3. – С. 1163-1170.
11. Шойдин С. А. Влияние аберраций, вызванных разюстировкой схемы, на емкость голограммного запоминающего устройства // *ОМП.* – 1981. – № 3. – С. 1-3.
12. Кольер Р., Беркхарт К, Лин Л. Оптическая голография. – М. : Мир, 1973. – 686 с.
13. Burke W. J., Ping Sheng Crosstalk noise from multiple thick phase hologras / W. J. Burke, Ping Sheng // *Journal of Applied Physics,* 1977. – v. 48. – № 2. – P. 681-685.
14. Гуламов А. А. Формирование супергауссовых лазерных пучков // *Курский государственный университет.* – 2006. – С. 12.
15. Hannah W.J. Embossed holographic movies / *Материалы Пятой Всесоюзной школы по голографии (29 января - 3 февраля 1973 г.).* – <http://bsfp.media-security.ru/school5/index.htm> (последнее обращение 10.03.2020).
16. Wyatt R.B. The emergence of a digital cinema // *Computers and the Humanities.* 1999. Т. 33. № 4. С. 365-381.
17. Комар В. Г. Новое в мировой кинотехнике. – М. : Искусство, 1967. – С. 19.
18. Pierce J. R. Symbols, Signals and Noise: The Nature and Process of Communication. – London: Hutchinson, 1962. – 334 с.
19. Рапопорт Б. И. Возможности передачи голографического изображения малокадровой телевизионной системой / *Техника кино и телевидения.* – 1971. – № 9. – С. 42.
20. Ганжерли Н. М., Денисюк Ю. Н., Коноп С. П., Маурер И. А. Толстослойный бихроммированный желатин для голографии, чувствительный в красной области спектра / *Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург // Письма в ЖТФ.* – 2000. – Том 26. – Вып. 16. – 26 августа 07;12.
21. Шойдин С. А. Способ дистанционного формирования голографической записи / *Патент РФ № 2707582, приоритет от 03.07.2018, Опубликовано: 28.11.2019.* – Бюл. № 34.

© С. А. Шойдин, 2020