

51. Информационные особенности голограмм: повышение информационной ёмкости и устранение избыточности

С. А. Шойдин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

Рассмотрены проблемы, возникающие при голографической записи информации, препятствующие работе по удалённой записи голограмм. Упрощённые оценки плотности записи информации Хилла корректируются с учётом влияния аберраций оптических систем и путями уплотнения голограмм, использующих кодированные опорные пучки. Оценено влияние формфактора голограмм на их дифракционную эффективность и информационную ёмкость. Приведены результаты первых опытов по частичному наложению голограмм в одной из разработанных систем голографической памяти. Сделан логический переход от записи информации в голограммах плоскими бинарными массивами к записи произвольных 3D изображений и оценено количество содержащейся в них информации. Предложен путь сокращения лишней избыточности для реализации возможности высококачественной передачи изображительных голограмм на расстояние, пригодный для технической реализации разработок в области динамической 3D дополненной реальности, голографического кино и телевидения.

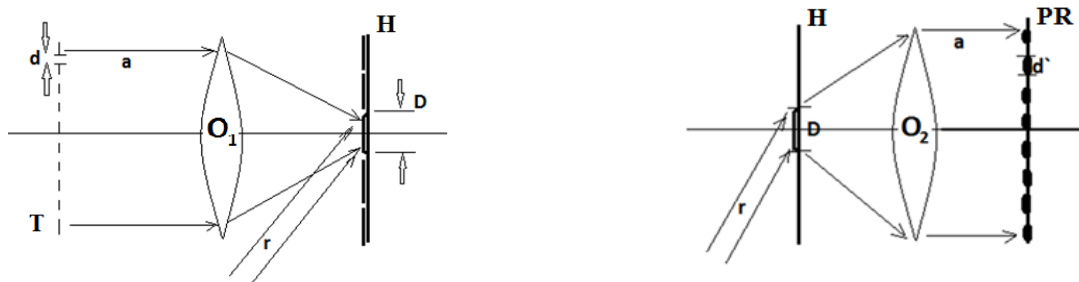
Ключевые слова: Оптика, Голография, Голографический материал, Формфактор, Информационная ёмкость, Плотность записи информации, Дополненная реальность, Голографическое кино, Голографическое телевидение.

Цитирование: Шойдин, С. А. Информационные особенности голограмм: повышение информационной ёмкости и устранение избыточности / С. А. Шойдин // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 266–278.

1. Запись бинарной информации в гзу

1.1. Первые оценки плотности записи информации в голограммах

В различных задачах хранения и обработки изображений особое место занимают голографические системы и устройства. Вскоре, после появления первых работ Ю. Н. Денисюка [1], в которых говорится о возможности хранения полной информации об объекте, появляются работы Ван Хирдена [2] и Хилла [3], в которых предлагается использовать голограммы для записи и хранения информации в двоичном виде в качестве памяти для компьютеров и других вычислительных систем. В [2, 3] за основу была взята схема (рисунок 1) с записью матриц Фурье-голограмм в одной плоскости и восстановления каждой голограммой матрицы точек в другой плоскости — плоскости изображения. Расстояние между голограммами определялось допустимым перекрёстным шумом, возникающим от восстановления соседних голограмм «хвостами» восстанавливающего нужную голограмму лазерного гауссова пучка. Далее



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

Рис. 1

появились работы по практической реализации записи двоичной информации на оптический носитель [4–9]. Практически во всех этих работах рассматривалась возможность регистрации двоичной информации в виде матриц двоичных световых сигналов (пикселей).

В такой схеме плотность записи информации n достигает произведения числа записанных голограмм Nh на количество информационных ячеек Nt в каждой и ограничивается дифракционными пределами записывающей и восстанавливающей оптических систем.

$$n = Nh \cdot Nt \approx \frac{St \cdot Sh}{d^2 D^2} = \frac{St}{d^2} \frac{Sh}{\lambda^2 f^2 / d^2} = \frac{St \cdot Sh}{(\lambda^2 f^2)} = \frac{Sh}{\lambda^2} \omega^2 = Sh \left(\frac{\omega}{\lambda}\right)^2 \quad (1)$$

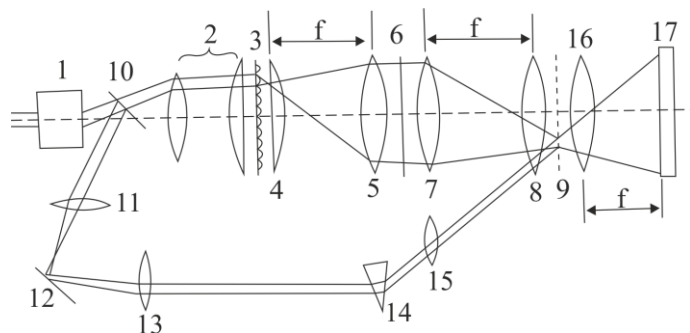
Здесь St и Sh – площадь транспаранта и голограммы соответственно, d и $D = \lambda f / d$ – размеры ячейки транспаранта и одиночной голограммы, λ – длина волны записи, f – фокус записывающего и восстанавливающего изображение объективов, $\omega = \sqrt{St} / f$ – относительное отверстие записывающего объектива, а n имеет смысл плотности точек на голограмме.

В таком приближении при $\omega = 1$, что соответствует хорошим оптическим системам, плотность записи бинарной информации соответствует примерно одному биту на площади, равной λ^2 , что для $\lambda = 0,63$ мкм примерно соответствует $n = 2,5$ Мбит/см².

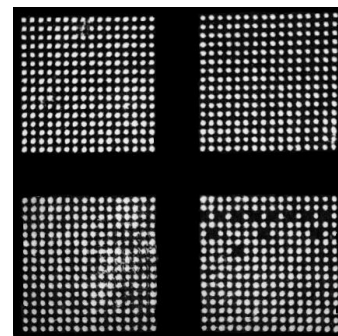
1.2. Ограничения плотности записи, накладываемые оптической системой

В практической работе по созданию таких устройств [7, 9–10], создаваемых по классической схеме (рисунок 2), вскоре выяснилось, что на плотность записи существенно влияют характеристики оптической системы, в частности, aberrации оптических систем записи и восстановления, которые проявляются в размытии гауссова пятна в плоскости Фурье-голограмм и в размытии изображения матрицы восстановленных пикселей в плоскости фотоприёмника на величину соответствующих лучевых aberrаций оптики записи и восстановления.

В этой модели, объединившей оптическую систему и голограмму, для любой величины оптических aberrаций, а также механических допусков позиционирования, записывающих



1 – дефлектор лазерного излучения; 2 – коллимирующий объектив; 3 – линзовый растр; 4, 5 – компоненты первого Фурье-объектива; 7, 8 – второго; 16 – третьего; 6 – информационный управляемый транспарант с наложенной на его ячейки случайной фазовой маской; 9 – матрица голограмм; 17 – фотоприёмная матрица; 11–15 – оптические элементы формирования смещающегося по голограммам опорного пучка
а) схема ГЗУ



б) восстановленное изображение информационной матрицы транспаранта, состоящей из 4 субматриц повторяющих структуру фотоприёмной матрицы

Рис. 2

голограмму объектного, опорного и восстанавливающего пучков, была определена [6, 7] поправка на максимально возможную плотность записи бинарной информации (2).

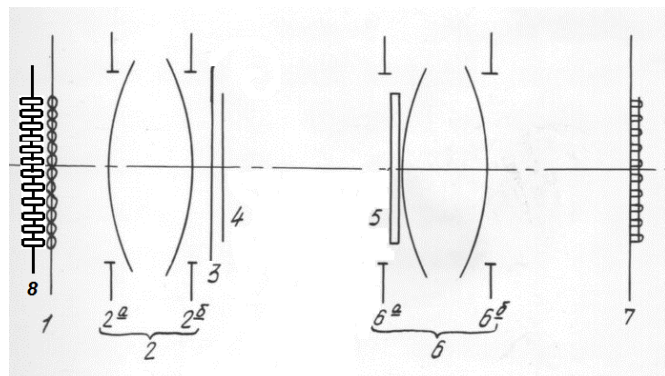
$$n' = n \left[C^2 A_1^2 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\Theta C_1}{5A_1^2}} \right)^2 A_2^2 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\Theta}{10A_2^2}} \right)^2 \right]^{-1} \quad (2)$$

Здесь $A_1 = \delta_1/l_h$ и $A_2 = \delta_2 \pi l_h / \lambda f$ относительные aberrации записывающей и восстанавливающей оптической системы, δ_1 – лучевые aberrации записывающего Фурье-объектива, δ_2 – восстанавливающего, f – фокус 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 (рисунок 3а).

Видно (2), что при наличии aberrаций записывающей δ_1 и восстанавливающей δ_2 системы возможен выбор оптимального размера голограммы l_h , максимизирующей n' в ГЗУ. Это показало связь между качеством используемых оптико-механических узлов ГЗУ и голограммами. Aberrации и нестабильность используемых в [7–11] оптико-механических узлов приводили к снижению плотности записи бинарной информации, которая [9] достигала уже $n' = 0,26$ Мбит/см², что ставило вопрос о путях увеличения плотности записи.

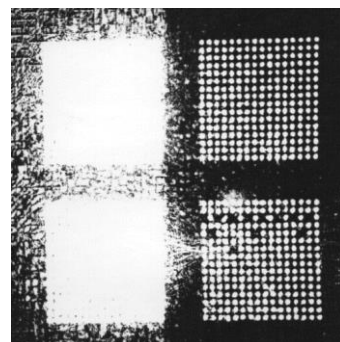
1.3. Увеличение плотности записи за счёт частичного наложения голограмм

Увеличивать плотность записи голограмм было предложено за счёт частичного наложения голограмм в матрице голограмм, записываемых в объёмной среде с помощью кодированного опорного пучка [12–15]. Снижение перекрестных помех достигалось использованием объёмной голографической среды и кодированием опорного пучка, формируемого так же, как и объектный пучок и имеющего узкую функцию пространственной корреляции, определяемую



- 1 — линзовый растр; 2а и 2б — компоненты первого Фурье-объектива; 6а и 6б — компоненты второго Фурье-объектива; 3 — информационный управляемый транспарант с наложенной случайной фазовой маской 4, 5 — матрица голограмм; 7 — фотоприёмная матрица; 8 — матрица полупроводниковых лазеров

а) схема безопорного ГЗУ



- б) восстановленное в «безопорном» ГЗУ изображение информационной матрицы, состоящее из 4 субматриц по форме фотоприёмной матрицы, на котором видны участки, подвергшиеся большим, или меньшим абберационным искажениям, включая как абберации оптики, так и самих голограмм. Две левых субматрицы выполняют роль восстанавливающего пучка, две правых — восстановленного

Рис. 3

размером спекл-структуры. Уплотнение голограмм достигалось сдвигом по полю голографического материала на величину функции корреляции, меньшую, чем размер голограммы. Практически удалось увеличить плотность записи на порядок и такое наложение голограмм друг на друга исчерпало динамический диапазон фотоотклика. Поэтому основное внимание было направлено на поиск материалов с фазовым фотооткликом и большим динамическим диапазоном [16–18]. Схема с кодированным опорным пучком и частичным наложением голограмм (рисунок 3) была названа «ГЗУ без опорного пучка» [10, 13].

На рисунке 4 приведено изображение, полученное сканированием вдоль одной из строк восстановленных с голограммы пикселей в ГЗУ, по схеме на рисунке 3. Видно, что существует пороговый уровень, уверенно отделяющий логические единицы и нули, значит предложенная в [10, 13] схема работоспособна. Величина разброса шумов видна на нижних участках кривой и определяется множеством факторов. Шумами различной природы управлять сложно, поэтому на практике для повышения отношения сигнал — шум одним из главных требований является повышение дифракционной эффективности η голограмм.

Для повышения η , прежде всего, используются голографические материалы с большим динамическим диапазоном фотоотклика. Однако при записи голограмм на такой фотоматериал, как «Реоксан» [12, 15], было экспериментально обнаружено несоответствие [10, 15] роста дифракционной эффективности η голограмм формулам теории объёмных голограмм Когельника [19]. Рост дифракционной эффективности ограничивался по непонятным причинам далеко от Когельниковского максимума. На рисунках 5а и 5б приведены экспериментально полученные графики зависимости η от экспозиции. Видно, что рост η с экспозицией имеет не

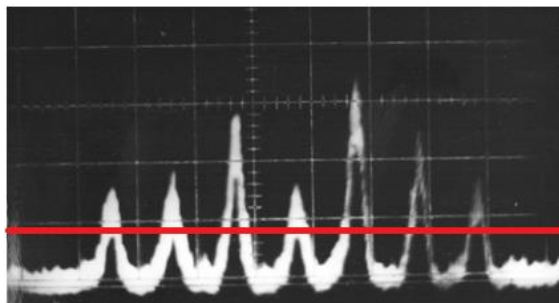
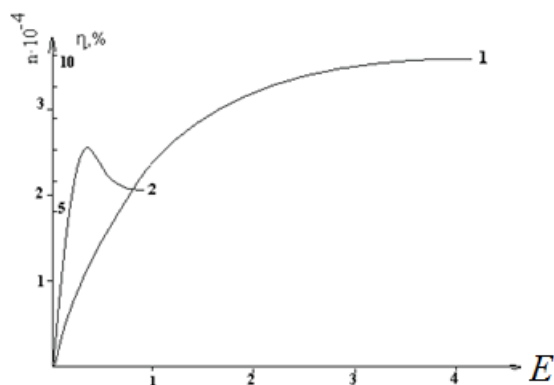
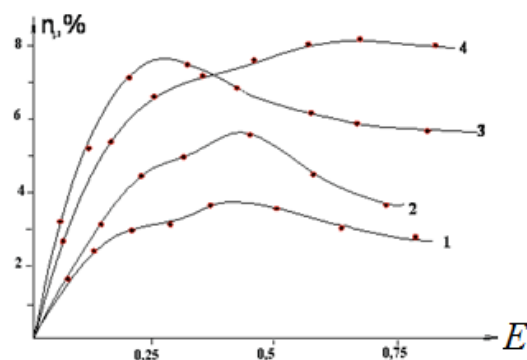


Рис. 4. Распределение интенсивности в контрольной строке восстановленного кодированным опорным пучком изображения



1 — зависимость изменения фотоиндуцированного показателя преломления Dn от экспозиции E при регистрации голограмм, 2 — зависимость дифракционной эффективности η Фурье-голограмм, сформированных гауссовыми пучками

а)



кривая 3 соответствует наиболее точному попаданию голограммы в Фурье плоскость, кривые 1, 2 соответствуют голограммам, расположенным перед плоскостью Фурье, а кривая 4 — голограмме за Фурье-плоскостью

б) зависимость дифракционной эффективности η голограмм, сформированных в окрестностях Фурье-плоскости записывающего объектива,

Рис. 5

простой вид, η вначале растёт, причём медленнее расчётных [19] значений, а затем начинает падать, далеко не достигая максимума, предсказанного Когельником.

Так был впервые замечен эффект, ограничивающий дифракционную эффективность голограмм. Позже выяснилось, что эти ограничения η связаны с фактором формы записываемого сигнала, названного впоследствии формфактором [20–29]. Аналогичные результаты можно увидеть в экспериментальных графиках других работ [30–31], хотя они и не были объяснены. Это ограничение η повлияло на то, что практически максимальное уплотнение записи бинарной информации в ГЗУ по схеме на рисунке 3 достигло величины чуть меньше одного порядка. Голограммы вдоль каждой из пространственных координат матрицы Фурье-голограмм накладывались на расстоянии $1/3$ их диаметра, перекрываясь на $2/3$. Коэффициент уплотнения был равен $k = 3 \times 3 = 9$.

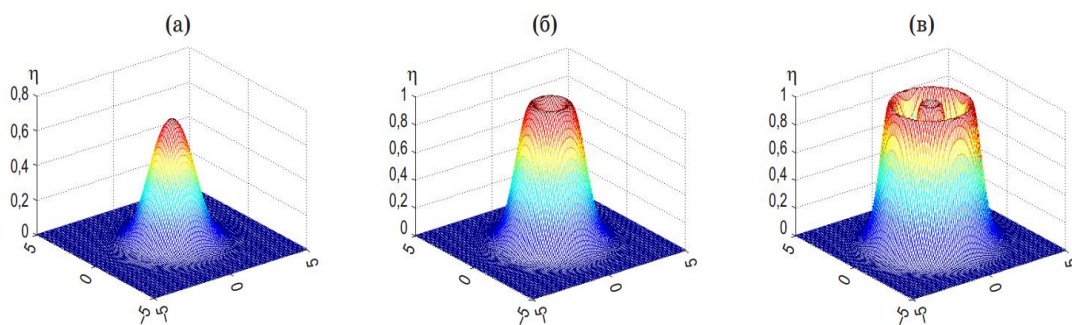


Рис. 6. Возрастающая от (а) к (в) экспозиция приводит сначала к росту η , а затем к провалу в центре, и снова к росту, как на экспериментальных графиках (рис. 5), так и на расчётных (рис. 6)

1.4. Ограничение дифракционной эффективности и формфактор

Дифракционная эффективность при засветке голограммы растёт не одинаково по полю, сначала вырастая до максимума в наиболее ярких участках, а затем уменьшаясь за счёт эффектов перекачки взаимодействующих пучков, как это показано на рисунке 6.

Для объёмных фазовых голограмм величина локальной дифракционной эффективности η описывается в модели связанных волн Когельника [19]. Эта (Брэгговская) модель (3), хорошо описывает дифракцию в таких материалах, как Реоксан, Диффен и в ряде полимеров [16–18]. В (3) функция $f(EV)$ — фотоотклик на экспозицию E при видности интерференционной картины V ,

$$\eta(x, y) = \sin^2\{f[E(x, y)V(x, y)]\}. \quad (3)$$

Для поверхностных голограмм, на халькогенидных стеклообразных полупроводниках (ХСП) и азополимерах, дифракция описывается в модели Рамана — Ната (4).

$$\eta(x, y) = J_1^2\{f[E(x, y)V(x, y)]\}. \quad (4)$$

Здесь J_1 — функция Бесселя первого порядка. Полная дифракционная эффективность $\eta_m(E, V)$ получается (5) интегрированием локальных $\eta(x, y)$ по полю голограммы.

$$\eta_m = \frac{1}{S} \iint \eta(x, y) dx dy. \quad (5)$$

Здесь и далее, аналогично [22–30], экспозиция E приводится в нормированных единицах так, что $E = 1$ изменяет фотоотклик голографического материала, приводя к росту аргумента под синусом, равному одному радиану. Таким образом, экспозиция $E = \pi/2$, при $\beta = 1$ приводит (3) к $\eta = 100\%$ при видности $V = 1$ в соответствии с выражением, найденным Когельником, в которое вырождается (6) при $\Psi f(EV) = f(EV)$. На рисунке 7 сплошной кривой приведена зависимость $\eta_m(E, V)$, рассчитанная по (3, 5) при экспозиции гауссовым пучком Брэгговской голограммы. Для сравнения, на рисунке 7 приведен пунктирной кривой график классической Когельниковской [19] зависимости η от нормированной экспозиции E . Видно, что $\eta_m(E, V)$ растёт нелинейно, как бы сначала забираясь на первую ступеньку, а потом на следующую.

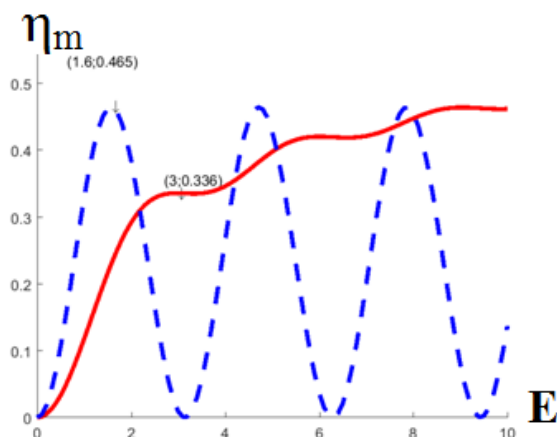


Рис. 7. Зависимость η_m по (5) от экспозиции E (сплошная кривая) и η по (3) (пунктирная кривая) уменьшенная примерно в 2 раза по амплитуде до максимальных значений η_m с целью удобства сравнения положений максимумов соответствующих кривых. Полученный формфактор $\Psi_1 = 1,6/3,0 = 0,53$

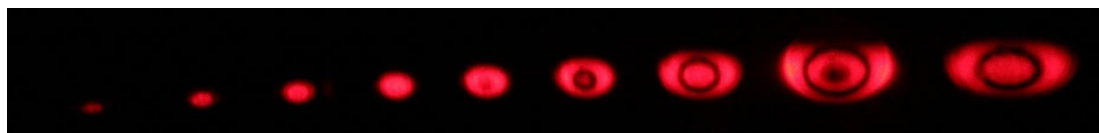


Рис. 8. Яркость восстановленного голограммой изображения с ростом экспозиции (слева направо)

Сплошная кривая на рисунке 7 ведёт себя аналогично экспериментально обнаруженным на рисунках 5а и 5б. Фактор формы Ψ приводит к запаздыванию в достижении максимума η_m и величина запаздывания такова, как если в (3) подставить коэффициент Ψ , численно равный этому запаздыванию (6).

$$\eta = \Omega \sin^2[\Psi f(EV)]. \quad (6)$$

Из рисунка 7 видно, что $\Psi = 0,53$, а η_m достигает 33,6 %.

Аналогичные результаты (рисунок 8) были получены [32–33] для плоских голограмм -дифракция Рамана — Ната. Полученные в одинаковых условиях записи голограмм значения формфактора и для дифракции Брэгга, и для дифракции Рамана — Ната практически совпадают.

На рисунке 8 видно как с увеличением экспозиции возникают в центре и расходятся по краям кольца нулевой яркости, которые соответствуют точкам перехода функции Бесселя через очередной ноль с ростом её аргумента. Полученные экспериментально для ХСП результаты не только полностью подтвердили полученные ранее для Реоксана (рисунок 6, 7), но и были использованы для приближённого, качественного определения величины фотоотклика исследуемого голографического материала.

Эффект формфактора оказался крайне полезным, но помешал поиску путей увеличения плотности записи голограмм за счёт их частичного совмещения. Формфактор ограничил дифракционную эффективность голограмм, расходуя динамический диапазон фотоотклика

среды в несколько раз быстрее. В расчёте на одну голограмму такой расход оказывается примерно в 4 раза больше, чем при записи голограмм равномерными плоскими пучками (рисунок 7).

2. Количество информации в голограмме с записью 3d изображения

2.1. Количество информации, содержащееся в изобразительной голограмме

По формуле Шеннона [34] для канала с шумами плотность записи информации определяется (7),

$$N = W \log_2(1 + I_c/I_{ш}), \quad (7)$$

где W — ширина полосы частот, в нашем случае пространственных частот дифракционной решётки голограммы, равная предельно разрешимой плотности точек $W = n$ или при учёте аббераций $W = n'$ из (1, 2), а $I_c/I_{ш}$ — отношение сигнал-шум в восстановленном изображении, эквивалентное отношению дифракционной эффективности восстановленного голограммой сигнала к дифракционной эффективности рассеянных ею шумов $(I_c / I_{ш}) = (\eta / \eta_{ш}) = m$. Аргумент логарифма в (3) при $I_c/I_{ш} \gg 1$ имеет смысл числа разрешимых уровней яркости (m) восстановленного сигнала, а сам логарифм — отношения $\eta / \eta_{ш}$ в Белах, так, что $10 \cdot \log_2(\eta / \eta_{ш}) = \Theta[\text{дБ}]$.

$$N = kn' \frac{\Theta}{10}. \quad (8)$$

Следовательно, (7) можно представить в виде (8) и плотность записи информации в изобразительной голограмме можно оценить как плотность записи точек (пикселей) также как в ГЗУ с бинарной записью матриц изображений, но умноженное на отношение сигнал — шум в децибелах ($\Theta/10$) или на двоичный логарифм количества разрешимых уровней яркости m . Последнее, по терминологии телевизионных стандартов — глубина цвета монохромного изображения. Реальная глубина каждого из трёх цветов RGB в стандарте TrueColor составляет $256 = 2^8$ бит, что соответствует 8 битному кодированию глубины цвета и $\Theta = 80$. Собирая вместе $k = 9$, $n' = 0,26$ Мбит/см² и $\Theta = 80$ можно (8) оценить плотность записи информации, в изобразительной голограмме N (9). Таким образом, для изобразительной голограммы размером

$$N = 9 \cdot 0,26 \cdot 10^6 \cdot 8 = 1,9 \cdot 10^7 \text{ бит/см}^2. \quad (9)$$

A4 (210 × 297 мм) количество записанной на неё информации $M = N \cdot 210 \cdot 297 = 1,2 \cdot 10^{12}$ бит = 1,2 Тбит = $1,5 \cdot 10^{11}$ байт. Для современных сетей со скоростью 4G (1 Гбит/с) передача такой голограммы займёт 50 минут. Для сетей будущего [35] со скоростью передачи данных 5G (до 100 Гбит/с) — около ½ минуты. Такие результаты убивают саму идею голографического кино и телевидения, для реализации которых (передачи трёх цветов с частотой 25 кадров в секунду плюс служебная информация) потребуются сети со скоростью порядка 100 Тбит/с. Это практически перекрывает весь доступный радиодиапазон, включающий все эфирные радио и телепередачи. Хотя для просмотра аудиторией из четырёх человек гологра-

фическое кино с носителем на плёнке высокого разрешения было создано [36], но для телевидения это неприемлемо. Поэтому сегодня особо актуальны усилия по сжатию таких больших массивов информации.

2.2. Избыточность информации в регистрируемом голограммой 3D объекте

В [37, 38] прямо говорится о необходимости поиска удобных способов сжатия голографической информации до приемлемых размеров, но не позволяющих воспринимать 3D изображение, как искусственное: «Необходимость регистрации сцены при естественном свете — далеко не единственная трудность, возникающая при создании объемного кино и телевидения, не менее важно найти способы сокращения избыточности голографической записи». При этом глаз не должен замечать виртуальное происхождение сцены. Образно говоря, имеющаяся в голографическом изображении визуальная информация о строении пор на коже человека, как для задач голографического кино, так и для задач виртуальной (дополненной) реальности, избыточна. Необходимо обратить серьёзное внимание на поиск методов сжатия такой голографической информации и устранения ненужной избыточности.

Известные способы удалённого формирования 3D изображений стремительно развиваются, но основываются, в основном, на вычислении и захвате узлов и рёбер 3D картины, снимаемой множеством камер [39]. Узлы и рёбра передаются на расстояние, например, по радиоканалу, а текстуру между рёбрами передают отдельно, наполняя её соответствующим цветом. Именно этот способ развивают сегодня во множестве компьютерных игр, и он исчерпал себя, т. к. легко видеть, что движущиеся фигурки всё же имеют искусственное происхождение.

Другой способ сжатия голографического изображения предложен в [40]. Он основан на отдельном построении топографической поверхности объекта (мы её назвали «Маска») и нанесённой на эту поверхность фотографической картины объекта. И тот и другой массивы не превышают по порядку величины размеры обыкновенного фотографического кадра и не переносят излишней информации, которая закладывается в голограмму при её записи методом фотографирования интерференционной картины (1). Маска может быть создана различными способами, в т. ч. лазерным сканированием. Количество информации, закладываемое в такую маску, эквивалентно количеству информации в голограмме, записанной не в видимом диапазоне длин волн, а в диапазоне, определяемом расстоянием между регистрируемыми точками поверхности маски. По формуле (1) для $\lambda = 1-10$ мм, что соответствует частоте излучения 30–300 ГГц, количество информации, требуемой для регистрации маски размером А4 (210 × 297 мм), равно 60–600 Кбайт, что даже меньше, чем одна чёрно-белая фотография того же размера в стандарте Full HD (1920 × 1080 пикселей). Без сжатия это ≈ 2 Мбайт, а в формате jpg может быть порядка 100 Кбайт.

Таким образом, в [40] предложен способ синтеза голограммы 3D объекта, в котором информация о фазе регистрируется в радиодиапазоне электромагнитного излучения (маска), а информация о поверхности, нанесённой на эту маску, регистрируется в видимом диапазоне



Рис. 9

длин волн. В предложенной технологии количество информации, закладываемое в голограмму 3D объекта по порядку величины, такое же, что и в фотографии поверхности. Оно регистрируется в виде двумерной матрицы комплексных чисел и позволяет регулировать ту часть избыточности, которую мы сочтём лишней для формирования объёмной картины (рисунки 9).

Заключение

К основным информационным особенностям голограмм относится наличие в них огромных объемов информации, содержащихся как в специальных голограммах для ГЗУ, так и в традиционных изобразительных голограммах. При передаче на расстояние таких объемов информации требуются каналы, сравнимые со всем существующим радиодиапазоном, включая все радио- и телеканалы. Предлагается решать проблему создания виртуальной 3D модели голографируемого объекта, передаваемой на приёмный конец любого электронного канала связи, например радиоканала, способом, позволяющим регулировать объём передаваемой информации. С использованием информационных особенностей голограмм (большие массивы, избыточность, ограничение η формфактором, разделение информации об амплитуде и фазе объекта) можно добиться того, чтобы выполнялось условие достаточности передаваемой информации для синтеза виртуальной 3D голограммы, способной восстановить реальное 3D голографическое изображение объекта, зрительно не отличающегося от изображения реального объекта, находящегося на передающем конце канала связи. Такое изображение может создаваться с использованием одной фотокамеры обычного стандарта разрешения, например, Full HD. Для динамической передачи таких кадров по 1920×1080 точек по 2 байта на каждую, т. е. 33 Мбит на кадр с частотой 25 кадров в секунду требуется канал со скоростью передачи информации около 800 Мбит/с., что соответствует уже развивающимся линиям связи 4G и 5G. Такие 3D изображения могут быть использованы при создании динамически меняющихся картин дополненной реальности или голографического кино и TV.

Список источников

- [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 Large Capacity Holographic Memory. — Appl.Opt. — 1972. — Vol. 11. — № 1. — P. 182–196.
- [4] **Патент № 686994 US.** Голографическая система запоминания и воспроизведения информации. — 1971.
- [5] **Гибин, И. С.** Программируемое голограммное ЗУ с записью и считыванием информации / И. С. Гибин, Т. Н. Мантуш, Ю. Е. Нестерихин, Б. Н. Панков, Е. Ф. Пен, П. Е. Твердохлеб // Автометрия. — 1975. — № 3. — С. 3–11.
- [6] **Авторское свидетельство № 701350, СССР.** Голографическое запоминающее устройство / С. И. Соскин, С. А. Шойдин, В. И. Левин. — Опубл. 01.04.1977.
- [7] **Соскин, С. И.** Расчет оптической схемы голографического запоминающего устройства / С. И. Соскин, С. А. Шойдин // Опт. и спектр. — 1978. — Том 44. — № 3. — С. 566–573.
- [8] **Выдрин, Л. В.** Экспериментальная оптико-электронная (голографическая) система памяти / Л. В. Выдрин, Н. Н. Вьюхина, И. С. Гибин, В. Н. Затолокин, С. Ф. Кибирев, Т. Н. Мантуш, Ю. Е. Нестерихин, Б. Н. Панков, Е. Ф. Пен, П. Е. Твердохлеб, Ю. Н. Тищенко, А. В. Трубецкой // Автометрия. — 1980. — № 2. — С. 60–67.
- [9] **Betin, A. Yu.** Holographic memory optical system based on computer-generated Fourier holograms / V. I. Bobrinev, S. S. Donchenko, S. B. Odinokov, N. N. Evtikhiev, R. S. Starikov, S. N. Starikov, E. Yu. Zlokazov // Applied Optics. — 2013. — Vol. 52. — № 33. — P. 8142–8145.
- [10] **Шойдин, С. А.** Исследование влияния aberrаций оптической системы на плотность записи информации в ГЗУ. — Дисс. на соиск. уч. ст. к.ф.-м.н., на правах рукописи. — Ленинград. — ГОИ им. С. И. Вавилова. — 1982. — 192 с.
- [11] **Соскин, С. И.** Исследование голографического запоминающего устройства в режиме записи одиночных голограмм / С. И. Соскин, С. А. Шойдин // ОМП. — 1980. — № 11. — С. 3–8.
- [12] **Шойдин, С. А.** Определение информационной ёмкости матриц голограмм в объемной среде / С. А. Шойдин // Сборник трудов четвертой всесоюзной конференции по голографии. — Ереван. — 1982. — С. 149–153.
- [13] **Shoydin, S. A.** Holographic Memory Without Reference Beam / ISSN 1060-992X // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). — 2016. — Vol. 25. — № 4. — P. 262–267.
- [14] **Шойдин, С. А.** Экспериментальное наблюдение пространственного резонанса спекл-поля с неоднородностями показателя преломления / С. А. Шойдин, В. В. Шкунов, Е. А. Сандер // ЖЭТФ. — 1985. — № 1. — С. 116–119.
- [15] **Сандер, Е. А.** Исследование голографической записи двоичной информации в объемной регистрирующей среде реоксан / Отв. ред. Ю. Н. Денисюк, Е. А. Сандер, В. И. Суханов, С. А. Шойдин. — Оптическая голография. — Л.: Наука, 1983. — С. 77–89.
- [16] **Суханов, В. И.** Разработки ГОИ в области объемных регистрирующих сред для голографии / В. И. Суханов, А. В. Вениаминов, А. И. Рыскин, Н. В. Никоноров / Ю. Н. Денисюк — основоположник отечественной голографии: Сб. трудов Всероссийского семинара. — СПб.: СПбГУ ИТМО. — 2007. — С. 262–276.
- [17] **Андреева, О. В.** Обратимые и необратимые изменения оптических параметров образцов полимерного материала «Диффен», обусловленные воздействием излучения / О. В. Андреева, Б. Г. Манухин, Н. В. Андреева // Тезисы докладов XIV международной конференции HOLOEXPO. — Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. — С. 198–202.
- [18] **Шелковников, В. В.** Получение и свойства голографического фотополимерного материала в гибридной золь-гель матрице / В. В. Шелковников, В. В. Русских, Е. В. Васильев, Е. Ф. Пен, В. И. Ковалевский, И. А. Кучин // Оптич. журнал. — 2006. — Том 73. — № 7. — С. 65–69.

- [19] **Kogelnik, H.** Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings // The Bell System Technical Journal. — 1969. — Vol. 48. — № 9. P. 2909–2947.
- [20] **Шойдин, С. А.** Дифракционная эффективность голограмм, записанных гауссовыми пучками // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2015. СибОптика. — 2015: Сб. материалов междунар. науч. конф. — Новосибирск: Изд-во Сиб. ун-т геосистем и технологий. — 2015. — Том 5. — С. 71–76.
- [21] **Shoydin, S. A.** Requirements to Lasers and Form Factor of Holograms // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). — 2014. — Vol. 23. — № 4. — P. 287–294. — ISSN 1060-992X.
- [22] **Шойдин, С. А.** О требованиях к параметрам источника излучения для голографии // Лазеры. Измерения. Информация. 2013: Сб. докл. — СПб.: Изд-во СПб. Политехнич. ун-та. — 2013. — Том 1. — С. 94–107.
- [23] **Шойдин, С. А.** Требования к лазерному излучению и формфактор голограмм // Оптический журнал. — 2016. — Том 83. — № 5. — С. 65–75.
- [24] **Шойдин, С. А.** Метод достижения максимальной дифракционной эффективности голограмм на основе оптимизации формфактора // Компьютерная оптика. — 2016. — Том 40. — № 4. — С. 501–507.
- [25] **Шойдин, С. А.** Формфактор голограмм и модификация статистики / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев. — Национальная конференция с междунар. участием «СибОптика-2018», г. Новосибирск, 23 апреля 2018 г. — Новосибирск: Изд-во Сиб. ун-т геосистем и технологий. — 2018. — В печати.
- [26] **Шойдин, С. А.** Требования к лазерному излучению и формфактор голограмм // Оптический журнал. — 2016. — Том 83. — № 5. — С. 65–75.
- [27] **Привалов, В. Е.** Формфактор и временная когерентность излучения / В. Е. Привалов, С. А. Шойдин // Оптический журнал. — 2018. — Том 85. — № 9. — С. 25–30.
- [28] **Шойдин, С. А.** Формфактор голограмм сложных изображений / С. А. Шойдин, А. В. Трифанов // Компьютерная оптика. — 2018. — Том 42. — № 3. — С. 362–368.
- [29] **Шойдин, С. А.** Влияние нелинейности фотоотклика на дифракционную эффективность голограмм // Автометрия. — 2019. — Том 55. — № 1. — С. 39–35.
- [30] **Ганжерли, Н. М.** Особенности записи голограмм на пленках AsSe излучением гелий-неонового лазера / Н. М. Ганжерли, В. И. Коченов. — Оптическая обработка информации. — Л.: Наука, 1978. — С. 26–37.
- [31] **Ганжерли, Н. М.** Перенос голографической структуры со слоев бихромированного желатина на подложку на основе полиметилметакрилата / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, И. А. Маурер, Д. Р. Хазвалиева // Оптика и спектроскопия. — 2018. — Том 124. — № 3. — С. 400–403.
- [32] **Шойдин, С. А.** О формфакторе голограмм на ХСП и азополимере / С. А. Шойдин, А. Ю. Мешалкин // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии: Труды XXVI Междунар. конф. 10–15 сент. 2018. — Новороссийск: РИО ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2018. — С. 18–19.
- [33] **Shoydin, S. A.** The hologram's formfactor on a chalcogenide glassy semiconductor and azopolymer / S. A. Shoydin, A. Yu. Meshalkin // Journal of Physics Conference Series. — 2019. — В печати.
- [34] **Pierce, J. R.** Symbols, Signals and Noise: The Nature and Process of Communication. — London: Hutchinson, 1962. — 334с.
- [35] **Osseiran, A.** Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project / A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten // IEEE Communications Magazine. — 2014. — Vol. 52. — № 5. — P. 26–35.
- [36] **Комар, В. Г.** Новое в мировой кинотехнике. — М.: Искусство, 1967. — С. 19.
- [37] **Рапопорт, Б. И.** Возможности передачи голографического изображения малокадровой телевизионной системой // Техника кино и телевидения. — 1971. — № 9. — С. 42.

- [38] **Голографическое кино и телевидение** / Энциклопедия по машиностроению. Оборудование, материалы, механика. — Том XXL. — С. 115 / URL: <https://mash-xxl.info/info/565185>
- [39] **Патент № US20060187297A1 US**. Holographic 3-d television. МПК H04N 5/77.
- [40] **Шойдин, С. А.** Заявка на изобретение № 2018124440/28(038712) от 03.07.2018.