

Особенности синтеза SSB голограмм (SSBH)

С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

В работе показана возможность передачи голографической информации в реальном времени по обычным радиоканалам путём её сжатия за счёт устранения несущей и использования одной боковой полосы. С этой целью, согласно патенту РФ № 2 707 582, информация о 3D объекте фиксируется в виде двух 2D кадров, один из которых представляет собой текстуру поверхности объекта, а второй карту глубин его поверхности. Из двух основных способов создания такой карты глубин, методом ToF и методом структурированного света, ввиду ряда преимуществ выбран последний. Он использован для макетирования процесса регистрации 3D портрета живого человека в реальном времени. Показана возможность создания 3D телевидения и 3D дополненной реальности без применения специальных очков и других носимых наблюдателям устройств на основе предложенного метода разделения несущей пространственной частоты и частот, содержащих информацию об объекте голографирования.

Ключевые слова: голография, цифровая голография, интерференция, голографические интерференционные полосы, 3D-фотография, однополосная модуляция, 3D-телевидение, 3D-дополненная реальность.

Цитирование: Шойдин, С. А. Особенности синтеза SSB голограмм (SSBH) / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // HOLOEXPO 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 207–218.

Введение

Практически сразу после появления первых работ по голографии [1] исследователи стали обращать внимание на большие потенциальные возможности голограмм для хранения информации. В работах [2, 3] были предложены первые оптические схемы предназначенных для этого голографических запоминающих устройств (ГЗУ). Это связано с тем, что голограмма регистрирует всю информацию о монохроматическом волновом фронте, используемом для записи информации. Восстановленное голограммой изображение имеет поперечное разрешение h , как и в обычной оптической системе переноса изображения, определяемое так называемым критерием Рэлея [4] равное диаметру пятна Эйри (1).

$$h \approx \frac{\lambda^2}{D/f}, \quad h \sim \lambda / \left(\frac{D}{f}\right) \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения, D — поперечный размер голограммы, f — расстояние до точки восстановленного изображения. В силу высокого разрешения количество информации N , которое может быть записано на такую голограмму, согласно исследованиям [2, 3], по порядку величины может быть оценено как (2). Дальнейшие практические разработки [5–13] вносили существенные коррективы, связанные с одной стороны с определением ограничений на плотность записи информации в ГЗУ, а с другой с поиском путей увеличения плотности записи. Приближённо оценивать достижимую ёмкость записи информации n в голограммах

можно по (2), взяв за основу [5–10], откуда она может быть определена, как количество точек, размер которых определяется диаметром пятна Эйри (2).

$$n \approx \Omega^2 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^2 = S^2 \left(\frac{\Omega}{\lambda} \right)^2, \quad (2)$$

где $\Omega = D/f$ — относительное отверстие отображающей системы, в нашем случае голограммы, а S — её площадь. Следовательно, при $\Omega = 1$, что характерно для хороших оптических отображающих систем, плотность записи информации на голограмму соответствует примерно одному биту на площади, равной λ^2 , что в видимом диапазоне длин волн соответствует пространственным частотам примерно 2–3 линий/мкм.

Для изобразительных голограмм реальных портретов человека, размером А4 (210×297 мм), что соответствует телевизионному экрану с диагональю 14 дюймов, при $\lambda=0,63$ мкм количество точек в голограмме достигает $n = 1,6 \cdot 10^{11}$, что при бинарной записи соответствует такому же количеству информации, измеренному в битах. Это примерно $n = 2 \cdot 10^{10}$ байт ≈ 20 Гб и эквивалентно информации, содержащейся в часовом кинофильме стандарта Full HD. Однако каждая из этих точек несёт в себе разные значения яркости (полутонные изображения), чей вклад, согласно формуле Шэннона [14], может быть оценён из (3), N — ёмкость записи для полутонных изображений $I_c/I_{ш}$ — отношение сигнала к шуму в восстановленном изображении.

$$N = n \log_2 \left(1 + \frac{I_c}{I_{ш}} \right), \quad (3)$$

При $I_c/I_{ш} \gg 1$ аргумент логарифма в выражении (3) имеет смысл количества различных состояний (m) восстановленного голограммой сигнала в каждой точке изображения (или голограммы), а сам логарифм превращается (4) в отношение сигнал/шум, выраженное в децибелах

$$\Theta = 10 \log_2 m. \quad (4)$$

Тогда (3) принимает вид

$$N = n \frac{\Theta}{10}. \quad (5)$$

При реальных значениях $m = 256$, что соответствует цифровому стандарту *TrueColor*, значение Θ будет достигать 80 дБ. Таким образом, увеличение числа градаций яркости в голограмме не приводит к значительному увеличению количества записанной в ней информации, но всё же может увеличивать общую информационную ёмкость почти на порядок, до $N = 160$ Гб, или $1,7 \cdot 10^{11}$ байт.

Передача таких массивов с частотой кадровой развёртки 25 Гц требует ширины W [Гц] двоичного цифрового канала (6), с пропускной способностью $C = 4 \cdot 10^{12}$ байт/сек.

$$W = \frac{C}{\log_2 256}. \quad (6)$$

Ширина полосы пропускания при этом составляет около 500 ГГц, что с лихвой перекрывает весь доступный сегодня радиодиапазон. Действительно, одни из первых разработчиков голографического TV [15] пишут: «...в связи с высокой удельной плотностью голографической информации необходимо регистрировать и передавать по каналам связи большое число дискретных элементов голограмм, что превышает по разрешению и скорости обработки реальные возможности существующих TV устройств и стандартных каналов связи...». По этому поводу у одного из основателей голографии, Ю. Н. Денисюка было отмечено [16], что мы ещё недостаточно знаем о фундаментальных принципах голографии для создания новых типов объёмного кинематографа и искусственного интеллекта.

Большие объёмы голографической информации, безусловно являющиеся большим преимуществом в других областях, в области голографического TV и задач дополненной реальности сыграли с разработчиками злую шутку, являясь одним из существенных препятствий передачи голографической информации по каналам связи. Выходом из сложившегося противоречия является либо существенное уменьшение размера голографического изображения, что плохо соответствует задачам дополненной реальности, либо сжатие голографической информации таким образом, чтобы её объём не превышал разумных пределов, т. е. возможностей современных каналов связи 3G и 4G.

Оказалось [17], что высокая информационная ёмкость голограмм без потерь полезной информации может быть уменьшена за счёт устранения избыточности, связанной с передачей несущей пространственной частоты. Действительно, как видно из рис. 1, при записи голограммы формируется дифракционная решётка, состоящая из двух компонент. Первая — это несущая частота, выполняющая в голографии задачу отклонения дифрагирующего пучка на угол, необходимый для пространственного разделения нулевого и минус первого порядков дифракции. Вторая — модулирующая её информационная составляющая, представляющая пространственный спектр преобразования Френеля и формирующая в пространстве восстановленное голограммой 3D изображение объекта. Сравнивая величину несущей частоты и ширину спектра реального 3D объекта, можно увидеть их существенную разницу и большой зазор между ними, который тоже традиционно учитывается как голографическая информация.

1. Амплитудная и фазовая модуляция в голографии

Ввиду отсутствия на сегодняшнем уровне техники возможности материальной реализации синтезированных цифровых объёмных отражательных голограмм по схеме Ю. Н. Денисюка [1], рассмотрим классическую схему записи пропускающих аналоговых голограмм в схеме Э. Лейта и Ю. Упатниекса [18], представленную на рис. 1. В случае линейного отклика голографического материала структура интерференционных полос формируется излучением объектного и опорного пучков (7).

$$I(x_1, y_1) = |U_1(x_1, y_1) + R(x_1, y_1)|^2, \quad (7)$$

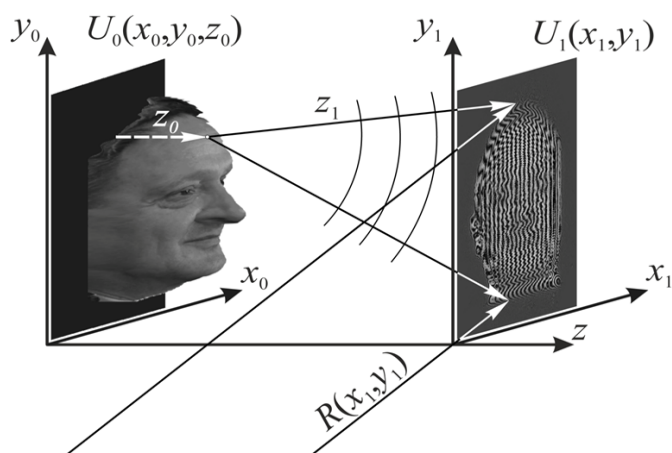


Рис. 1. Схема записи голограмм по Э. Лейту и Ю. Упатниексу. Комплексная амплитуда рассеянного объектом излучения формирует объектную волну $U_0(x_0, y_0, z_0)$, которая, распространяясь вдоль z , формирует в плоскости (x_1, y_1) комплексную амплитуду $U_1(x_1, y_1)$. В результате её интерференции в плоскости (x_1, y_1) с опорной волной $R_1(x_1, y_1)$, образуется голографическая интерференционная решётка $I(x_1, y_1)$, формирующая в голографическом материале, или на фотоматрице фотоотклик $\tau(x_1, y_1)$. Z_0 — расстояние от плоскости установки 3D объекта до точки на его поверхности

где $U_1(x_1, y_1)$ и $R_1(x_1, y_1)$ — комплексные амплитуды электромагнитного светового поля в плоскости записи голограмм (x_1, y_1) , представляющие в скалярном приближении теории дифракции объектный и опорный пучок соответственно. При записи такой интерференционной картины на фоточувствительный материал высокого разрешения под действием $I(x_1, y_1)$ возникает переменный по полю голограммы фотоотклик $\Delta\Psi(x_1, y_1)$. Для случая амплитудного отклика голографического материала это изменение пропускания материала $\tau(x_1, y_1)$, а для случая фазового отклика это изменение эйконала $\Delta\varphi(x_1, y_1)$, возникающего либо за счёт изменения локальной толщины по полю голограммы $\Delta l(x_1, y_1)$, либо переменного по полю голограммы показателя преломления $\Delta n(x_1, y_1)$, либо комбинацией всех трёх механизмов в пропорции, определяемой собственными физико-химическими свойствами голографического материала [19].

Далее, для упрощения выкладок и без ограничения общности основных выводов настоящей работы, будем считать $I(x_1, y_1) \ll I_0$ по всему полю голограммы, а фотоотклик $\Delta\Psi(x_1, y_1)$ амплитудным коэффициентом пропускания $\tau(x_1, y_1)$.

Структура такой голограммы имеет вид (8), где множитель перед косинусом представляет собой видность интерференционных полос V ; I_a и I_r — интенсивности, соответственно, объектного и опорного пучков, а под косинусом находится локальная разница фаз φ_a — объектного и φ_r — опорного пучка.

$$\begin{aligned} \tau(x_1, y_1) &= |U_1(x_1, y_1) + R(x_1, y_1)|^2 = \\ &= [I_a(x_1, y_1) + I_r(x_1, y_1)] \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\sqrt{I_a(x_1, y_1) \cdot I_r(x_1, y_1)}}{I_a(x_1, y_1) + I_r(x_1, y_1)} \cdot \cos[\varphi_a(x_1, y_1) - \varphi_r(x_1, y_1)] \right). \end{aligned} \tag{8}$$

Реально обе фазы меняются в пространстве. В опорной волне часто просто по линейному закону, когда она плоская и падает на голограмму под углом к нормали. А в объектной волне она формируется образом Френеля от сигнала, формируемого объектом. Пространственный спектр такой голограммы формируется из основной гармоники, имеющей смысл несущей пространственной частоты $\omega = k \sin \theta_r$, равной средней скорости изменения разницы фаз в пространстве (8), где θ_r — угол наклона к оптической оси опорного пучка. На пространственную частоту голографической решётки также влияет девиация, вызванная формой голографируемого объекта. Глубина модуляции пространственного спектра определяется видностью интерференционной картины V . Несущая частота (9) определяет угол поворота восстанавливающего пучка при его падении на голограмму,

$$\begin{aligned}\omega_{x_1} &= \frac{\partial \varphi_r(x_1, y_1)}{\partial x_1} = k \sin \theta_{x_1}, \\ \omega_{y_1} &= \frac{\partial \varphi_r(x_1, y_1)}{\partial y_1} = k \sin \theta_{y_1},\end{aligned}\quad (9)$$

а её девиация Ω — спектр дифракции волн, формирующих изображение записанного на голограмме объекта (10).

$$\begin{aligned}\Omega_{x_1} &= \frac{\partial \varphi_a(x_1, y_1)}{\partial x_1} = k \sin \Delta \theta_{x_1}, \\ \Omega_{y_1} &= \frac{\partial \varphi_a(x_1, y_1)}{\partial y_1} = k \sin \Delta \theta_{y_1},\end{aligned}\quad (10)$$

На голограмме формируются пространственные гармоники несущей частоты ω с волновым вектором k и боковые гармоники $\omega \pm \Omega$ с волновыми векторами $k \pm \Delta k$, аналогичные известному в радиотехнике [20] фазово-модулированному сигналу.

Они порождают дифракцию восстановленной волны в углы $\pm \theta_{x_1}$, $\pm \theta_{y_1}$ с периодами d_{x_1} , d_{y_1} , соответственно. Аналогично, девиация пространственных частот объектной волны порождает решётки с периодами от dx_1^{\min} до dx_1^{\max} и dy_1^{\min} до dy_1^{\max} (11).

$$\begin{aligned}d_{x_1} &= \lambda / \sin \theta_{x_1}, & d_{y_1} &= \lambda / \sin \theta_{y_1}, \\ d_{x_1}^{\max} &= \lambda / \sin(\theta_{x_1} - \Delta \theta_{x_1}), & d_{y_1}^{\max} &= \lambda / \sin(\theta_{y_1} - \Delta \theta_{y_1}), \\ d_{x_1}^{\min} &= \lambda / \sin(\theta_{x_1} + \Delta \theta_{x_1}), & d_{y_1}^{\min} &= \lambda / \sin(\theta_{y_1} + \Delta \theta_{y_1}).\end{aligned}\quad (11)$$

Таким образом, при освещении восстанавливающим пучком структуры $\tau(x_1, y_1)$, восстановленное голограммой излучение имеет основную пространственную гармонику, с периодом d_{x_1} , определяющую угол поворота восстанавливающего пучка, а также две боковых гармоники с периодами от $d_{x_1}^{\min}$ до $d_{x_1}^{\max}$, спектр которых формирует изображение объекта в плюс первом и в минус первом порядках. Угол падения опорной волны θ_{x_1} выбирают из соображений необходимости пространственного разделения пучков нулевого и минус первого порядка на заданном расстоянии z от голограммы (угол θ_{y_1} часто выбирают нулевым из соображений удобства), а углы, ограниченные $\Delta \theta_{x_1}$ и $\Delta \theta_{y_1}$ определяются пространственным спектром объектной волны. В несколько упрощённом одномерном случае для плоских равномерных по

площади их сечения волн спектр интенсивности голографического сигнала (8) похож на спектр однотонального сигнала (12).

$$\begin{aligned}
 U_1(\omega) = & \delta(\omega) + \\
 & + \frac{V}{2} \delta(\omega - k \sin \theta_{x_1} \pm \Omega) + \\
 & + \frac{V}{2} \delta(\omega + k \sin \theta_{x_1} \mp \Omega).
 \end{aligned} \tag{12}$$

Он представляет собой нулевую гармонику, восстанавливающий пучок R_V на которой порождает нулевой порядок дифракции с $\omega = kx \sin \theta_V$, где θ_V — угол наклона к оптической оси восстанавливающего пучка и ещё два пучка — плюс и минус первый, ответственные за восстановление действительного изображения на пространственной несущей $\omega = kx(\sin \theta_V - \sin \theta_{x_1})$ и мнимого с несущей $\omega = kx(\sin \theta_V + \sin \theta_{x_1})$.

Видно, что спектр (12) аналогичен спектру радиосигнала с частотной модуляцией, где полезный сигнал с пространственной частотой Ω расширяет спектр несущей частоты ω вправо и влево по оси пространственных частот. Также в (8), присутствует и амплитудная модуляция. Она проявляется в модулировании интерференционных полос коэффициентом видности V , пространственно расширяющем область нулевой и плюс-минус первой гармоники и зависящим от распределения интенсивностей объектного и опорного сигнала по полю голограммы. Таким образом, хотя есть и некоторые отличия, в целом выражение (8) показывает наличие и амплитудной и фазовой модуляции в спектре записываемой голограммы аналогично амплитудной и фазовой модуляции в радиотехнике.

Реально, несущая пространственная частота ω высока. Она сравнима с обратной длиной волны записи и её период составляет единицы микрометров. Спектр же объекта $\pm\Omega$ определяется степенью сложности его структуры. Даже при высоком разрешении, например, стандарт Full HD, максимально возможная пространственная частота составляет около 2000 линий на размере экрана, что при диагонали 36" ($\approx 0,9$ м), составляет около 3 лин./мм. Почти три порядка разницы с оценками по (2) позволяют рассчитывать на высокую степень сжатия голографической информации при кодировании на одной боковой полосе [21] (метод SSB). Традиционный метод строчной и кадровой развёртки с передачей информации о кадре поточечно включает передачу всех пространственных частот голограммы. Избыточность, которая присутствует при прямом кодировании голографического изображения, когда при передаче пространственных частот кодируются все частоты, в том числе и не несущие информацию об объекте голографирования, лежащие между $\omega = \Omega$ и $\omega = kx \sin \theta_{x_1} + \Omega$ не оправдана, хотя традиционно рассматривался именно такой метод передачи голографической информации [22]. Сжатие информации будет тем эффективнее, чем больше разница между несущей частотой $\omega = kx \sin \theta_{x_1}$ и её девиацией $\Omega = kx \sin \Delta \theta_{x_1}$, вызванной дифракционной расходимостью объектной волны.

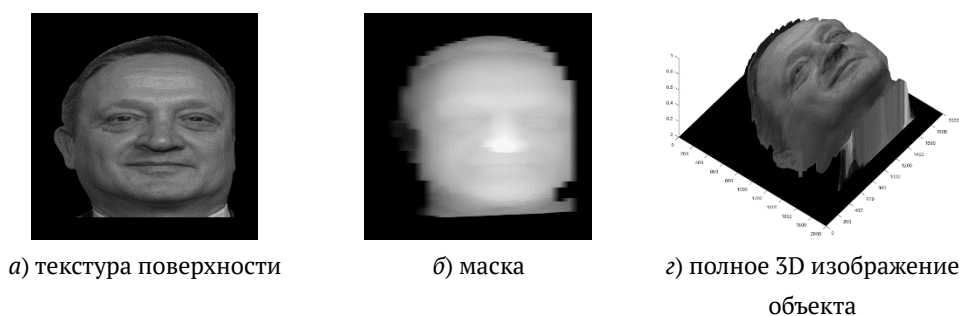


Рис. 2. Структура 3D объекта голографирования

Следовательно, аналогично [21] можно организовать передачу не всего фазово-модулированного сигнала со спектром (12), представляющего всю голограмму, а только ту её компоненту, которая соответствует боковой полосе (SSB) с пространственными частотами $\Omega = kx \sin \Delta\theta_{x1}$, несущими информацию о текстуре голографируемого объекта и о его карте поверхности, в дальнейшем называемой нами маской. Для этого достаточно иметь фотографию текстуры и созданную любым методом карту поверхности (маску). Мы из соображений простоты не использовали развивающийся сегодня метод ToF, хотя, возможно, за ним будущее, а остановились на более простом методе структурированного света [23]. При значительном сокращении объёма передаваемой информации и сравнительной простоте метода структурированного света появилась возможность записи информации о 3D живом объекте в реальном времени, передаче таких пар кадров по обычному радиоканалу и восстановлению 3D изображения на приёмном конце канала связи путём синтеза голограммы по переданной информации и цифровому внесению в неё несущей пространственной частоты.

Для восстановления изображения на приёмном конце канала передачи необходимо снова ввести несущую частоту. Для этого в патенте [17] предлагается на приёмном конце канала связи синтезировать голограмму численными методами.

2. Численное моделирование

Для численного эксперимента использовалось изображение объекта в Full HD качестве и даже несколько больше — 2000 строк на 2000 столбцов (рис. 2).

При синтезе дискретной голограммы было необходимо выполнение следующих основных пяти условий:

- 3D объект голографирования должен быть представлен как сумма слоёв по его глубине ввиду особенностей используемой программы преобразования Френеля (D-FFT). Удобно слои располагать нелинейно, увеличивая их частоту в наиболее значимых и информационных участках голографируемого 3D объекта. Объектная волна на голограмме при этом представляет собой сумму образов Френеля от каждого из слоёв.

- Следует использовать алгоритм введения в объектный пучок в плоскости объекта голографирования фазовую маску, сдвигающую фазы излучения отдельных ячеек случайным образом. Это реализует наложение фазового шума на объект голографирования, не искажая его изображение, что традиционно используется в голографии для устранения ярких всплесков

при записи голограммы и позволяет полнее использовать динамический диапазон фотоотклика голографического материала. Также, для дискретных цифровых голограмм случайная фазовая маска помогает уменьшать эффекты алиасинга в плоскости голограммы.

– Для функционирования программы необходимо, чтобы вычислительное устройство (РС) имело объём оперативной памяти больший, чем объём, занимаемый самой программой и оперативными данными, используемыми во время работы программы. Приведённые ниже вычисления голограмм объёмом до 2,7 Гб ($47\,500 \times 15\,000$ пикселей в формате single) осуществлялись на устройстве с 32 Гб оперативной памяти.

– В силу теоремы Котельникова [24] угол падения опорной волны должен быть таким, чтобы период интерференционных решёток голограммы был больше, чем две дискреты на голограмме $\Delta x = (x_{i+1} - x_i)$, что соответствует частоте Найквиста [25] для устранения возможной подмены пространственных частот и возникновения эффектов алиасинга (Aliasing).

– Чтобы при восстановлении дифрагировавшие пучки на расстоянии Z_{rec} не накладывались друг на друга, т. е. разошлись в пространстве, необходимо

$$Z_{rec} \geq \frac{L_{0x}}{\operatorname{tg} \theta_{rec}}. \quad (13)$$

Последнее накладывает ограничение на допустимый угол падения опорной волны (14).

$$\theta_{rec} \geq \operatorname{arctg} \frac{L_{0x}}{Z_{rec}}. \quad (14)$$

Как было отмечено выше, необходимо, чтобы ширина интерференционной полосы несущей частоты голографической пространственной решётки удовлетворяла условию Найквиста. Это значит, что период интерференционной решётки (11) для несущей частоты должен быть больше, чем два отсчёта (дискреты $\Delta x = x_{i+1} - x_i$) на голограмме. Для этого угол падения опорной волны при записи θ_{wr} , должен удовлетворять (15).

$$\frac{\lambda}{\sin \theta_{wr}} \geq 2\Delta x \cdot \frac{\lambda}{\sin(\theta_{записи})} \geq 2\Delta x \quad (15)$$

На рис. 3 приведена голограмма, рассчитанная вышеприведённым методом, а на рис. 4 — восстановленное ей изображение.

Видно, что голограмма рис. 3 состоит из размытых преобразованием Френеля интерференционных полос, формируемых сгруппированными вдоль интерференционной полосы точками разной яркости. Интерференционные полосы присутствуют как в центральном участке голограммы, где просматривается интерференционная структура искажённого преобразованием Френеля объекта, так и вне этого участка. Интерференционные полосы вне центрального участка отвечают за восстановление изображения, видимого под углом к оптической оси.

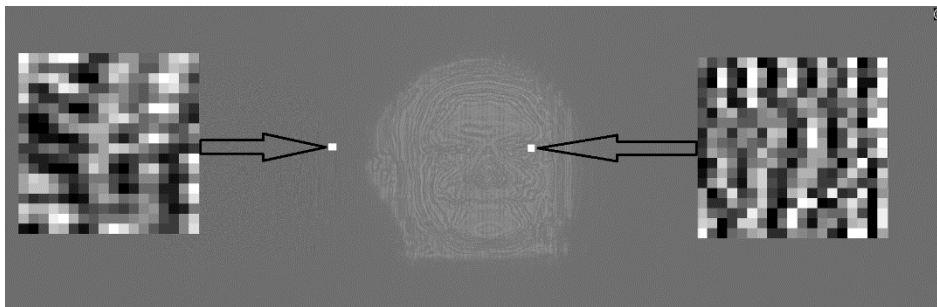
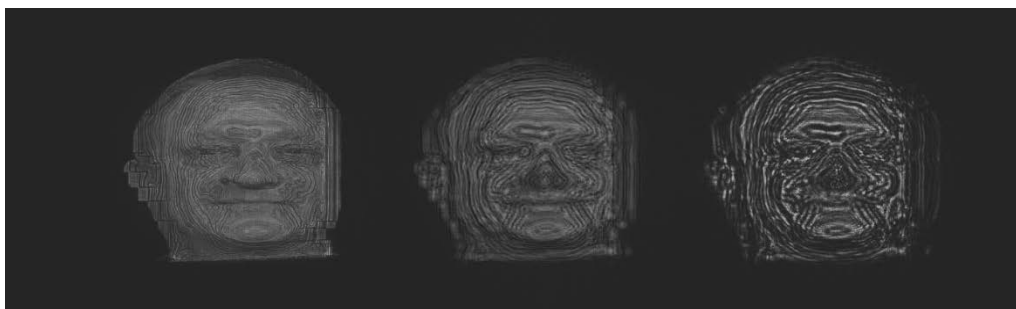
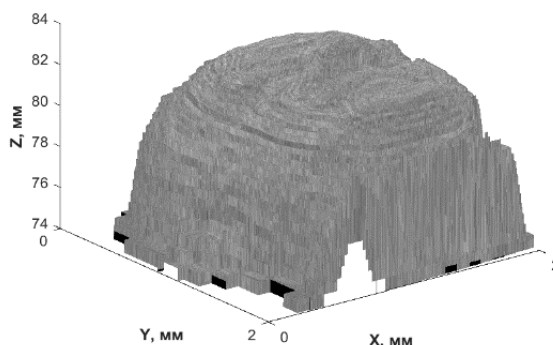


Рис. 3. Голограмма, размером $15 \times 47,5$ мм с шагом 1 мкм, $\lambda = 0,532$ мкм, наклон опорного пучка 9° , синтезированная на удалении от объекта на 74 мм (показаны увеличенные фрагменты голограммы)



а) три порядка дифракции, восстановленные голограммой (слева направо: $-1, 0$ и $+1$)



б) 3D восстановленное изображение из 64 слоёв

Рис. 4. Объём в восстановленном изображении

Дифракция восстанавливающего пучка на голограмме (рис. 3) образует (слева на право) восстановленное изображение объекта, нулевой порядок дифракции и плюс первый. Восстановленное голограммой изображение на рис. 4а состоит из 64 слоёв.

На рис. 4б приведена изопроекция 3D изображения объекта, восстановленного голограммой, записанной с использованием 64 слоёв, из которой видно, что объём синтезированной на приёмном конце канала связи голограммы восстановлен.

Изложенный в настоящей работе способ записи 3D информации о живом объекте в реальном времени с частотой обычной TV кадровой развёртки, её передача по обычному каналу связи, синтез по полученной информации на приёмном конце канала связи голограммы и восстановление ей 3D изображения голографируемого объекта позволяют не только решать

задачи голографического кино, телевидения и дополненной реальности, но и могут быть применимы в задачах комплексирования 3D изображений.

Заключение

В работе доказана возможность существования полного цикла, начиная от записи в реальном времени 3D изображения живого объекта, затем передачи его по обычному каналу Wi-Fi методом SSB с последующей реставрацией голограммы на приёмном конце канала связи и заканчивая восстановлением с её помощью переданного по каналу связи 3D изображения портрета человека. Это показывает практическую возможность осуществления голографического телевидения и систем дополненной 3D реальности при наличии динамического голографического дисплея.

В некотором приближении выражение (8) описывает систему интерференционных голографических полос как комбинацию известных в радиотехнике фазовой и амплитудной модуляции с заменой временной частоты на пространственные частоты. Если голограмма находится на плоском носителе, то это частоты ω_x и ω_y , если объёмная, то добавляется ещё одна частота ω_z .

Следует отметить, что само изображение поверхности 3D портрета человека (маска) более гладкое, чем его текстура, как минимум в 2 раза. Реально же, может быть и больше, поскольку мы обычно не замечаем глубины морщинок на лице человека, хотя почти всегда видим их проекцию на текстуре поверхности. Таким образом, передаваемая по каналу связи SSB информация может состоять из двух кадров. Первый передаёт текстуру поверхности и по разрешающей способности равен выбранному разработчиками TV стандарту, например Full HD, или 4K. Второй — передаёт карту поверхности объекта, или сюжета и он меньше кадра стандарта HD или Full HD, соответственно. Конечно, такой смешанный стандарт достаточен, но не всегда удобен, поэтому второй кадр может быть того же стандарта, что и первый, но дополнен служебной междустрочной и междукладовой информацией.

Возможности передачи такого 3D сигнала с частотой кадровой развёртки была доказана прямым моделированием, заключающемся в измерении времени, понадобившегося для передачи 500 пар кадров (текстуры и маски).

Для синтеза дискретной голограммы прямым методом необходимо выполнить условие ограничения частоты Найквиста для всех записываемых на голограмму пространственных гармоник (14), что накладывает ограничения на минимально допустимое количество точек на голограмме.

Природа формирования несущей частоты и природа её девиации различны. Несущая определяется углом схождения объектного и опорного пучков так, чтобы на определённом расстоянии восстановленное изображение объекта в минус первом пучке дифракции могло пространственно разойтись с нулевым порядком прошедшего сквозь голограмму восстанавливающего пучка. Пространственные частоты, вызывающие девиацию в несущей, сформированы в объектной волне и имеют другую причину, поскольку вызваны дифракцией Френеля

на объекте. Их физическая природа различна и это можно использовать при сжатии голографической информации.

Предложенный способ, заключающийся фактически в вычитании несущей пространственной частоты из голографического сигнала на передающем конце канала связи и добавления её на приёмном конце, позволяет записывать 3D изображение на одной длине волны, а восстанавливать на приёмном конце на другой, причём без абберационных искажений, присущих традиционным голограммам. Это может быть использовано в задачах комплексирования 3D динамически меняющихся изображений и расширении спектра отображаемого оптического сигнала, включая радиодиапазон, инфракрасное и ультрафиолетовое излучение.

За счёт большой разницы между несущей частотой и её девиацией в пространственных частотах голограммы возникает большой зазор, который при прямом (поточечном) кодировании информации формирует ненужную, бесполезную избыточность в передаваемой информации. Её можно убрать описанным выше методом, близким по своей сути к аналогичными методам SSB и ответить на вопрос Ю. Н. Денисюка [16] — да, теперь мы больше знаем о фундаментальных принципах голографии для создания новых типов объёмного кинематографа и телевидения, а также дополненной реальности, как составляющей в широком смысле части искусственного интеллекта.

Список источников

- [1] **Денисюк, Ю. Н.** Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения / Ю. Н. Денисюк // 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](#) / P. J. Van Heerden // Applied Optics. — 1963. — Vol. 2. — № 4. — P. 387–392.
- [3] **Hill, B.** Some Aspects of a Large Capacity Holographic Memory / B. Hill // Applied Optics. — 1972. — Vol. 11. — № 1. — P. 182–196.
- [4] **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф — М. : Наука, 1970. — 713 с.
- [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 № 701 350.** Голографическое запоминающее устройство / С. И. Соскин, С. А. Шойдин, В. И. Левин. — Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР за № 2468584 от 01.04.1977.
- [7] **Соскин, С. И.** Расчет оптической схемы голографического запоминающего устройства / С. И. Соскин, С. А. Шойдин // Оптика и спектроскопия. — 1978. — Том 44. — № 3. — С. 566–573.
- [8] **Шойдин, С. А.** Исследование влияния аббераций оптической системы на плотность записи информации в ГЗУ : Диссертация на соискание учёной степени к. ф.-м. н. — Ленинград, 1982. — 192 с.
- [9] **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.

- [10] **Соскин, С. И.** Исследование голографического запоминающего устройства в режиме записи одиночных голограмм / С. И. Соскин, С. А. Шойдин // ОМП. — 1980. — № 11. — С. 3–8.
- [11] **Шойдин, С. А.** Экспериментальное наблюдение пространственного резонанса спекл-поля с неоднородностями показателя преломления / С. А. Шойдин, В. В. Шкунов, Е. А. Сандер // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1985. — Вып. 1. — С. 116–119.
- [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](#) / S. A. Shoydin // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). — 2016. — Vol. 25. — № 4. — P. 262–267.
- [14] **Pierce, J. R.** Symbols, Signals and Noise: The Nature and Process of Communication / J. R. Pierce. — London : Hutchinson, 1962. — 334 p.
- [15] **Титарь, В. П.** Проблемы создания голографической телевизионной системы / В. П. Титарь, Т. В. Богданова // Радиоэлектроника и информатика. — 1999. — № 2. — С. 38–42.
- [16] **Денисюк, Ю. Н.** Достаточны ли известны фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объёмного кинематографа и искусственного интеллекта? / Ю. Н. Денисюк // Журнал технической физики. — 1991. — Том 61. — № 8. — С. 149–161.
- [17] **Патент № 2707582 РФ.** Способ дистанционного формирования голографической записи / С. А. Шойдин. — Оpubл. 28.11.2019.
- [18] **Leith, E. N.** Reconstructed Wavefronts and Communication Theory / E. N. Leith, J. Upatnieks // Journal of the Optical Society of America. — 1962. — Vol. 52. — P. 1123–1130.
- [19] **Кольер, Р.** Оптическая голография: монография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин; пер. с англ. под ред. Ю. И. Островского — М. : Мир, 1973. — С. 257–258.
- [20] **Гоноровский, И. С.** Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский — М. : Советское радио, 1977. — 608 с.
- [21] **Баскаков, С. И.** Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. — М. : ЛЕНАНД, 2016. — 528 с. — ISBN 978-5-9710-2464-4
- [22] **Рапопорт, Б. И.** Возможности передачи голографического изображения малокадровой телевизионной системой / Б. И. Рапопорт // Техника кино и телевидения. — 1971. — № 9. — С. 42.
- [23] **Geng, J.** [Structured-light 3D surface imaging: A tutorial](#) / J. Geng // Advances in Optics and Photonics. — 2011. — № 3. — № 2. — P. 128–160.
- [24] **Котельников, В. А.** [О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи — Всесоюзный энергетический комитет](#) / В. А. Котельников // УФН. — 2006. — Том 176. — № 7. — С. 762–770.
- [25] **Nyquist, H.** Certain topics in telegraph transmission theory / H. Nyquist // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. — 1928. — Vol. 47. — № 2. — P. 617–644.