

Точность восстановления волнового фронта при дифракции на паттерне, сформированном структурированным светом

С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

Обсуждаются вопросы точности воспроизведения волнового фронта при рассеянии света на паттерне, образованном с помощью структурированного света, латерально освещающего 3D-объект. Сравниваются результаты дифракции, полученные таким способом с изображением исходного 3D-объекта. В приближении скалярной теории дифракции показаны результаты численных экспериментов по дифракции света на разных вариантах таких паттернов. Обсуждается степень схожести восстановленных 3D изображений и возможные причины их отличий.

Ключевые слова: Голография, Передача информации, Дополненная реальность, Голографическое TV, Структурированный свет.

Цитирование: Шойдин, С. А. Точность восстановления волнового фронта при дифракции на паттерне, сформированном структурированным светом / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 41–51.

Введение

Как было показано в [1–3] для передачи голографического 3D видео по стандартному радиоканалу необходимо сжатие голографической информации на 5–6 порядков, что не удаётся реализовать традиционными методами энтропийного сжатия [4, 5]. Как показано в [6], в голограмме существуют два типа гармоник пространственной голографической решётки. Один из них носит служебную функцию высоких несущих частот и отвечает за разделение восстановленных голограммой порядков дифракции, отделяя в пространстве восстановленное 3D изображение объекта от пучка нулевого порядка дифракции. Второй тип гармоник порождается девиацией первых при интерференции объектного и опорного пучков во время записи голограммы. Именно этот тип гармоник порождает пространственную структуру голограммы, несущую информацию о голографируемом объекте. Он должен быть передан на приёмный конец канала связи для последующего синтеза там компьютерной голограммы. В [7] приведены результаты экспериментов по передаче голографического 3D видео по стандартному радиоканалу на основе использования одного из способов передачи без несущей. Он заключается в передаче двух основных модальностей 3D изображения – карты высот и текстуры поверхности. Было показано, что такой метод работает лучше, чем пространственно-частотная селекция спектра и с его помощью удалось передавать 3D голографические сюжеты с TV частотой кадровой развёртки, высоким (Full HD) пространственным разрешением и непрерывным параллаксом каждого кадра, что, по признанию [5], и обеспечивает наилучший результат при передаче 3D видео. Причём, в [7] для создания карты высот была использована технология структурированного света. Создавалось

латеральное освещение 3D-объекта системой параллельных полос и фиксировались их искривления. В [8] эта технология была заменена на более простую – технологию, использующую сам паттерн структурированного света вместо голограммы. Однако вопросы точности восстановления волнового фронта, повторяющего 3D карту высот объекта, при дифракции на таком паттерне оставались не исследованы. Определению основных моментов, определяющих степень сходства 3D изображений, полученных в результате дифракции, согласованной по условиям Брэгга восстанавливающей волны на указанном паттерне и на классической компьютерной голограмме, синтезированной по виртуальному 3D-объекту, посвящена настоящая статья.

Метод

Ошибки воспроизведения объёма дифракционной структурой, представляющей собой фотофиксированный паттерн латерально падающих параллельных полос складываются из двух механизмов. Первый – это точность с которой мы регистрируем положение каждой точки этих полос при фотофиксации (рис. 1) и второй – это точность с которой восстанавливается волновой фронт при дифракции на этом паттерне (рис. 2, 3).

Как показано в [9], для простейшей схемы (рис. 1) точность регистрации положения точек паттерна определяется выражением (1):

$$z(x) = \frac{d_x}{2\pi \cdot \operatorname{tg}(\theta)} \psi(x), \quad (1)$$

где $z(x)$ – величина смещения вдоль оптической оси точки на карте высот 3D-объекта, d_x – период проецируемой на 3D-объект структуры параллельных полос, θ – угол между направлением проекции и направлением оптической оси регистратора, $\psi(x)$ – фазовый сдвиг, связанный с периодом интерференционной картины (2).

$$\psi(x) = 2\pi u(x)/d_x. \quad (2)$$

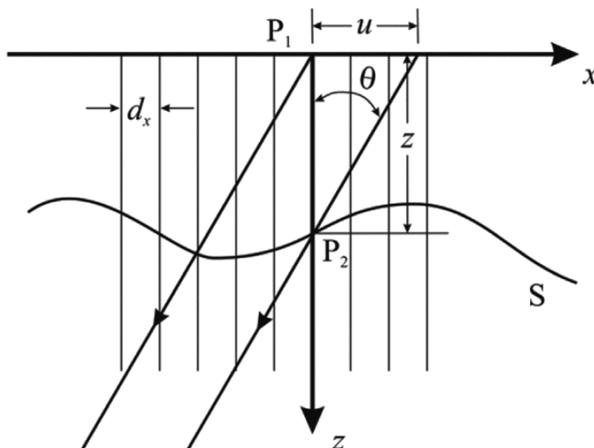


Рис. 1. Геометрия проекции паттерна полос на произвольную поверхность относительно базовой плоскости x , u – смещение точки полосы по оси x

Следовательно, ошибка глубины карты высот 3D-объекта Δz будет определяться выражением (3):

$$\Delta z(x) = \frac{d_x}{2\pi \cdot \operatorname{tg}(\theta)} \Delta\psi(x). \quad (3)$$

Полученный описанным выше способом паттерн для реального 3D-объекта показан на рис. 2. Здесь величина смещения полос определялась по смещению её границы.

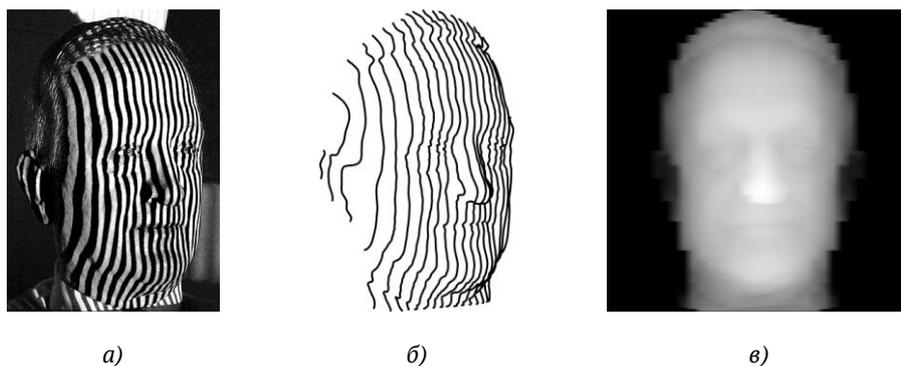


Рис. 2. Структура, сформированная латерально освещающей 3D-объект, системой параллельных полос, именуемая паттерном, сформированным из параллельных полос (ПСП): а) исходное изображение; б) выделенные границы полос; в) карта высот, построенная согласно (1), выраженная в градациях серого

Точнее смещение можно определять методом фазового сдвига Харихарана – Швайдера, описанным для разного количества фазовых сдвигов в [10–12], но в нашем случае полученной точности было достаточно. В эксперименте угол θ был около 9° , $d_x = 1$ см и $\Delta\psi$ не превышала $2\pi/10$. Значит Δz при глубине полупрофиля $z \approx 15$ см, была не больше, чем 9 мм или $9/150 \approx 6\%$:

$$\Delta z(x) \leq 9 \text{ мм}. \quad (4)$$

Причём ошибка по глубине изображения не возникала резко, а изменялась от края к краю изображения плавно, где-то достигая своего максимума и затем снова плавно спадая.

Другим источником искажений 3D изображения при дифракции на паттерне структурированных полос (ПСП) является дифракционное размытие, определяемое (рис. 3) величиной относительного отверстия $\omega = L_x/z_{\text{восст.}}$.

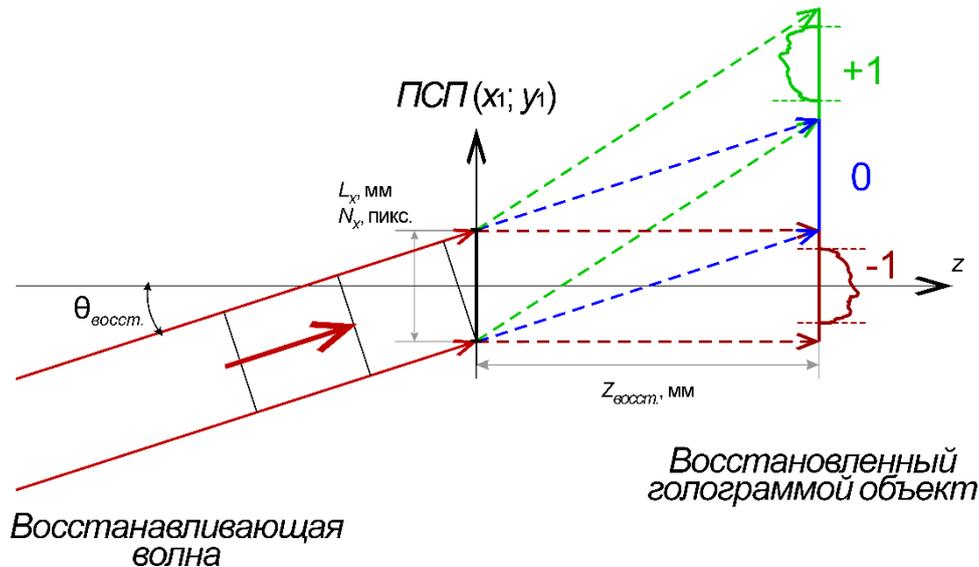


Рис. 3. Восстановление в схеме Лейта – Упатниекса 3D изображения на расстоянии $z_{восст.}$ от ПСП (x_1, y_1) , состоящего из M вертикальных (по оси x_1) полос, размером L_x с числом пикселей N_x вдоль x_1

Диаметр пятна Эйри, в плоскости восстановления изображения при этом, равен $1,22 \cdot \lambda / \omega$. Для голограмм сфокусированных изображений можно считать глубину изображения равной расстоянию $z_{восст.}$ и $z_{восст.} = L_x$, т. е. $\omega \approx 1$ и диаметр пятна Эйри порядка λ .

Если по [8] отождествлять дифракционную структуру на рис. 2 с голографической дифракционной структурой, то условия Брэгга для неё будут выполняться только на длине волны, сравнимой с её поперечным периодом. Исходно (рис. 2а), он равен $1/20$ размера изображения. Здесь следует отметить, что наши качественные оценки, сделанные только для понимания происходящих процессов дифракции, далее будут опираться на приближение, в котором горизонтальные сечения полученных 20 полос рассматриваются как синусоиды (ниже, в разделе «численное моделирование» мы покажем и более точные результаты дифракции на ПСП из рис. 2б).

Очевидно, что построение карты высот на рис. 2в происходит с точностью до девиации каждой из 20 полос. Все изменения поверхности, не попавшие на эти полосы, будут пропущены. Если частота полос такова, что захватывает все изменения глубины 3D-объекта, то можно утверждать, что карта глубин будет передана на хорошем уровне, а значит, выбирая частоту большего порядка, можно рассчитывать на то, что между соседними полосами ПСП перепад высоты будет происходить плавно. В этом случае, согласно [8], для перевода условий Брэгга в видимый диапазон длин волн необходимо увеличить пространственную частоту ПСП, ожидая, что такая структура, в основном, сохранит девиацию, а значит и дифракция света на ней восстановит исходное 3D изображение. Какова же точность восстановления девиации, а с ней и волнового фронта дифрагировавшей на ПСП волны? Очевидно, что эта точность ограничена сверху ограничениями, задающимися дифракцией на исходном объекте (ПСП), которые в угловой мере можно определить как угол дифракционной расходимости на той длине волны, на которой была создана структура ПСП, если бы она создавалась как

голограмма, интерференцией объектного и опорного пучков. В этом случае ПСП с периодом τ_1 будет иметь один кружок Эйри, с $\tau_2 = \tau_1/2$ – в два раза меньше, а с $\tau_3 = \tau_1/3$, соответственно – в три. При этом точность восстановления волнового фронта будет определяться точностью восстановления углового спектра θ , восстанавливаемого ПСП (рис. 4).

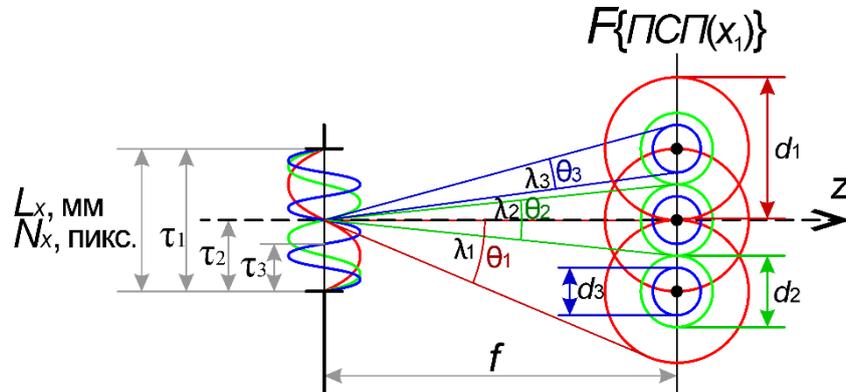


Рис. 4. Модель дифракции на паттерне структурированного света из трёх синусоидальных гармоник. L_x и N_x – размер ПСП в мм и в пикселях соответственно, τ_1 , τ_2 , τ_3 – периоды структуры ПСП, θ_1 , θ_2 , θ_3 и d_1 , d_2 , d_3 – угловой и линейный размеры дифракционного пятна Эйри образованные дифракцией света на ПСП излучением с длинами волн λ_1 , λ_2 , λ_3 , таких, что $\tau_1/\lambda_1 = \tau_2/\lambda_2 = \tau_3/\lambda_3 \approx 1$

В свою очередь, восстановление в пределах углового спектра, будет определяться длиной волны λ_i , когда изменения наклона опорной сферы эквивалентной оптической системы ПСП находятся внутри угла θ_i , определяемого угловым размером дифракции, примерно равным отношению диаметра пятна Эйри d_i к расстоянию до восстановленного изображения f (5). Поскольку с увеличением длины волны λ_i размер пятна Эйри, определяемый дифракцией на одном и том же отверстии L_x , будет увеличиваться пропорционально этой λ_i , а структура ПСП имеет период τ_i , характерный для дифракционной решётки (или голограммы) с длиной волны λ_i , то и точность восстановления волнового фронта θ_i в (5) будет ограничена отношением периода структуры ПСП τ_i к её размеру L_x :

$$\theta_i \approx d_i/f \approx \frac{\lambda_i}{L_x} \approx \frac{\tau_i}{L_x}. \quad (5)$$

Отсюда следует довольно простой и даже очевидный вывод, что точность восстановления волнового фронта ПСП будет не хуже размера длины волны, соответствующей по условиям Брэгга самой структуре ПСП. Так, для изображения рис. 2а,б, это примерно 1 см на базе, равной ширине объекта, это около 20 см или 5 % (6):

$$\Delta z(x)/f \leq \frac{d_x}{L_x} \approx 5\% \quad (6)$$

$$\Delta z(x) \leq \frac{d_x}{L_x} f = 0,05, f \approx 7 \text{ мм.} \quad (7)$$

Полученное значение близко к точности, определяемой допусками на определение карты высот методом структурированного света по ошибкам смещения положения паттерна (рис. 2б) при его фиксации (4).

Сама структура паттерна на рис. 2б даже внешне очень похожа на голографическую дифракционную решётку, но с периодом τ около сантиметра ($1/20$ размера объекта). Условия Брэгга для такой решётки должны выполняться для излучения, находящегося в радиодиапазоне длин волн $\lambda \sim \tau$. Именно этот факт привёл к мысли о возможности смещения условий Брэгга к видимому диапазону спектра путём увеличения частоты решётки простым медианным мультиплицированием, не изменяя существующей в ПСП девиации пространственной частоты, определяемой 3D картой высот. Такое мультиплицирование было выполнено выделением необходимого числа градаций яркости карты высот рис. 2в так, чтобы Брэгговская дифракция разводила нулевой и минус первый порядок дифракции на угол около $\theta \approx 9^\circ$. Этого было достаточно, чтобы недалеко от голограммы порядки разделялись полностью (рис. 3), а период решётки на ПСП, в плоскости (x_1, y_1) , как на голограмме, аналогично [8], состоял из трёх пикселей, что обеспечивало выполнение требований теоремы отсчётов Котельникова [13].

Таким образом, видно, что увеличение частоты пространственных гармоник, формирующих ПСП, приводит к увеличению точности представления восстановленного ПСП волнового фронта. Так, все пространственные гармоники, формирующие карту высот, разделятся на две группы. В первую войдут гармоники, которые имеют период больше периода полос ПСП, они будут переданы структурой ПСП, а вторые, имеющие меньший период – не будут. Напомним, что для восстановления 3D изображения в видимом диапазоне длин волн, требуется выполнение условий Брэгга. На основании того, что в [3, 6] было установлено, что классическая голограмма имеет две группы пространственных гармоник, одна из которых несёт служебную функцию и служит как несущая группа частот для разделения порядков дифракции при восстановлении, а другая отражает их девиацию (рис. 2) и формирует изображение 3D-объекта. Было сделано предположение о том, что в ПСП пространственные гармоники тоже отражают девиацию, неся в нём информацию об изображении 3D-объекта. Осталось для выполнения условий Брэгга в видимом диапазоне электромагнитного спектра соответствующим образом увеличить несущие частоты. Это было сделано способом с аппроксимацией положения мультиплицированных полос, основывающейся на интерполяции с учётом изменения расстояний в соседних полосах ПСП.

Численное моделирование

Аналогично [8], для удобства вычислений, как и при записи-восстановлении голограммы, при синтезе паттерна из параллельных полос мы сжимали глубину записываемого 3D изображения до $\lambda/2$, чтобы при вычислениях интегральных преобразований Фурье и Френеля, показывающих восстановленное 3D изображение, можно было использовать быстрые алгоритмы FFT и D-FFT без дополнительных алгоритмов развёртывания фазы. А

после указанных вычислений глубина 3D изображений восстанавливалась до прежнего размера.

Таким образом, были построены изображения, полученные дифракцией на ПСП (рис. 5) для разного количества полос паттерна, аппроксимацией с учётом изменения расстояния между полосами по двум соседним (Bilinear) [14].

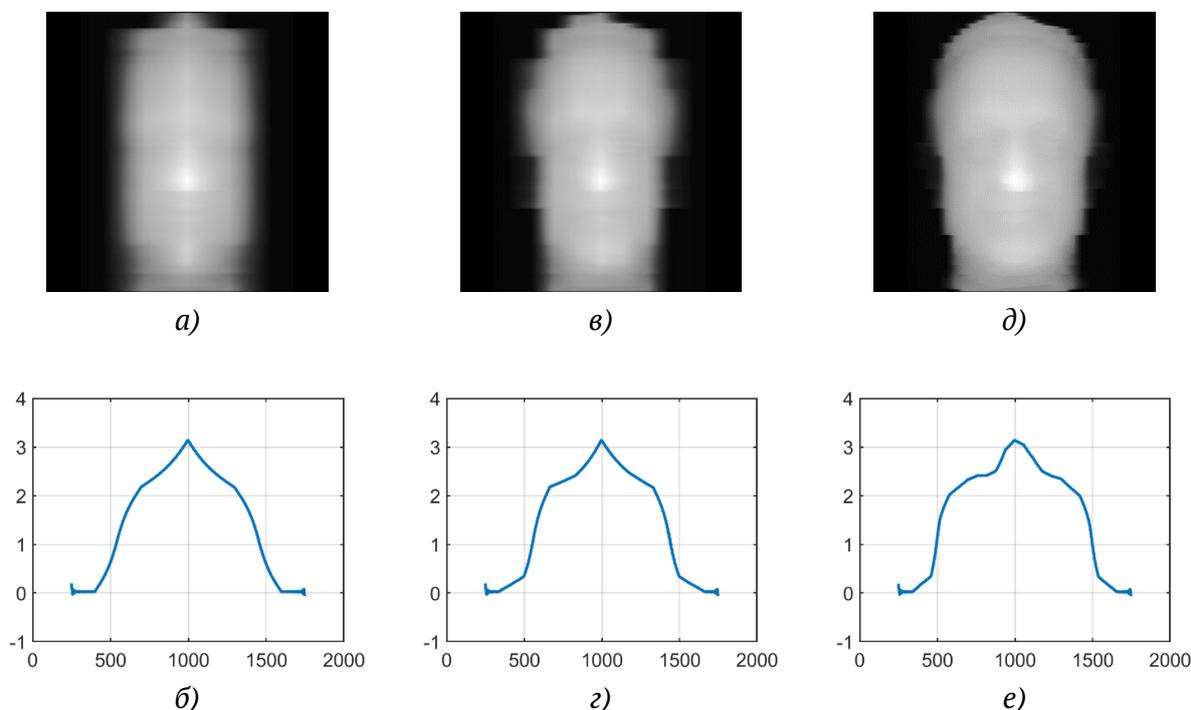


Рис. 5. Мультипликация ПСП, полученных соответствующими сечениями карты высот на рис. 2в: а) из $M = 5$ полос и б) её горизонтальное сечение по 1200 строке; в) из $M = 9$ полос и г) её горизонтальное сечение по 1200 строке; д) из $M = 25$ полос и е) её горизонтальное сечение по 1200 строке

На рис. 6 показаны 3D изображения, исходное (а) и восстановленные (б, в, г) по картам высот из рис. 5.

Из рис. 6 видно, что 5 полос совершенно недостаточно для передачи 3D изображения человека, а 9 полос – уже на грани адекватного восприятия. При этом, с одной стороны, человек уже узнаваем, но с другой стороны, присутствует эффект так называемой «зловещей долины» [15–16], а именно заметны неточности передачи деталей поверхности, как, например, в районе правой щеки или в районе левой части носа.

Более подробно это можно увидеть на увеличенных фрагментах этих изображений (рис. 7а–в). Лучше всего выглядит изображение рис. 6г, где отличия от исходного объекта (рис. 6а) практически незаметны. Откуда можно сделать вывод, что в карте высот исходного объекта есть гармоники с периодом выше $1/9$ и практически нет гармоник с периодом меньше, чем в $1/25$ от его размера. А более мелкие детали 3D изображения мы воспринимаем через перепады яркости на текстуре, не воспринимая их глубины.

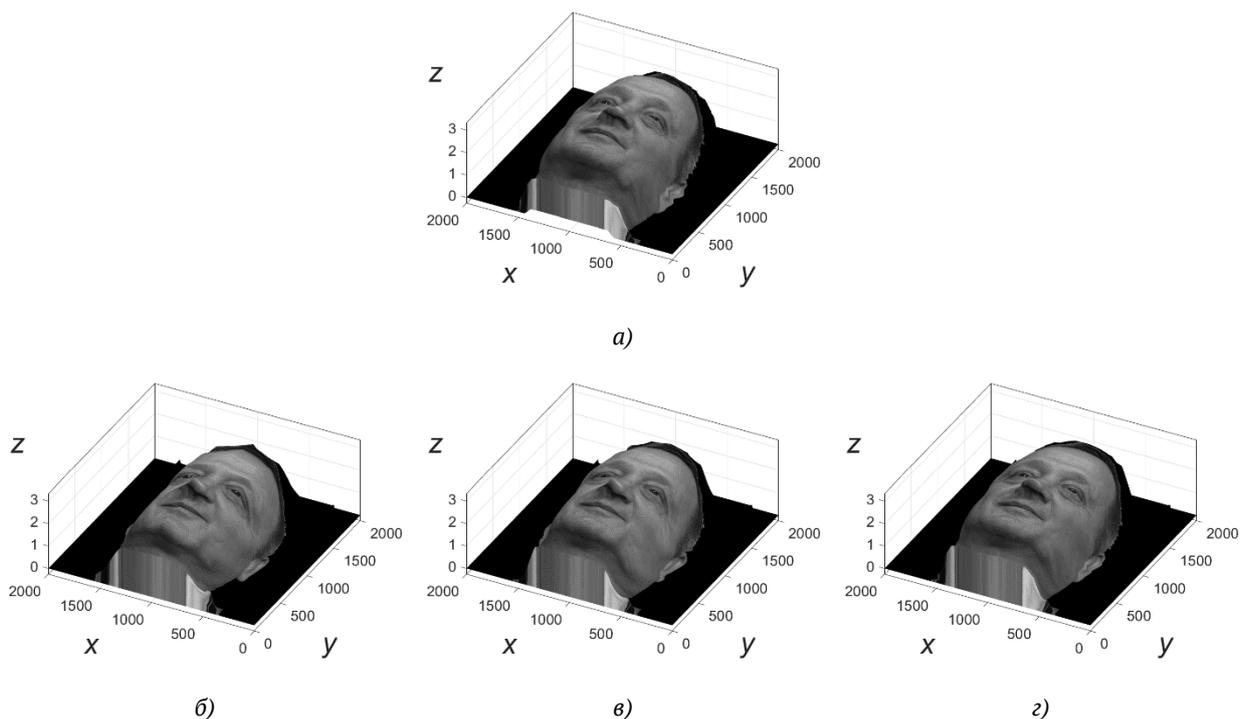


Рис. 6. Восстановленные 3D изображения, полученные дифракцией на ПСП для трёх случаев с 5, 9 и 25 полосами + интерполяция Bilinear:
 а) исходное 3D изображение; б) дифракция на паттерне из 5 полос;
 в) дифракция на паттерне из 9 полос; г) дифракция на паттерне из 25 полос

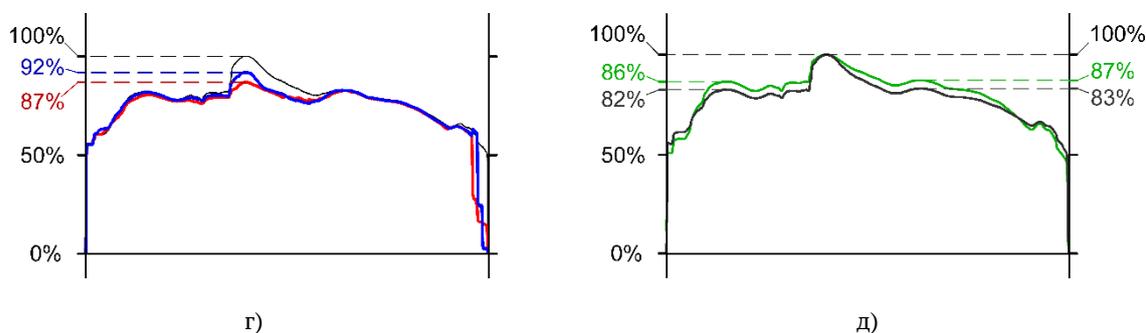
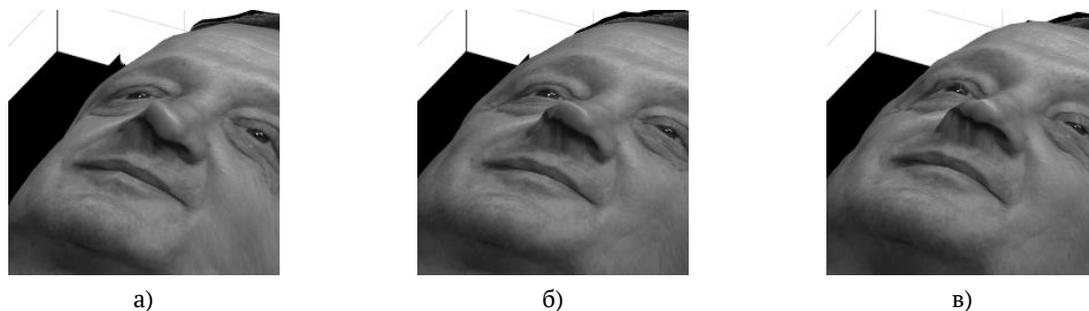


Рис. 7. Увеличенные фрагменты изображений при дифракции: а) на паттерне из 9 полос (рис. 6в); б) на паттерне из 25 полос (рис. 6г); в) исходное 3D изображение (рис. 6а); г) разница между а) и б) по 900 столбцу, где чёрным – столбец № 1000 с максимальной высотой, красным и синим – столбцы № 900 из а) и б) соответственно и д) разница между исходным изображением (рис. 6а) и восстановленным дифракцией на паттерне из 25 полос (рис. 6г)

Видно, что дифракция на паттерне из 9 полос в 900 столбце в районе носа (нумерация столбцов по рис. 6) имеет локальный провал по сравнению с дифракцией на 25 полосах. Его величина составляет примерно 5 % от глубины объекта, т. е. примерно 7 мм. Кроме того, само изображение, восстановленное дифракцией на паттерне из 25 полос, и исходное изображение в отдельных точках тоже отличаются на 4 %. Это свидетельствует о правильности оценок, проведённых выше.

Обсуждение и основные выводы

В работе приведены оценки точности восстановления волнового фронта, восстановленного при дифракции на паттерне структурированных полос (ПСП) опорной волны, согласованной с этим ПСП по условиям Брэгга. Показано, что неточность восстановления карты высот 3D-объекта определяется двумя основными эффектами. Первый из них – точность определения глубины методом структурированного света, лежащего в основе предложенного ранее метода дифракции на ПСП. Второй – точность восстановления волнового фронта дифракционными структурами с периодом τ_i .

Паттерн структурированных полос с периодом τ , при дифракции на нём света, при восстановлении 3D изображения объекта работает как фильтр пространственных гармоник, отрезая компоненты спектра с периодом меньше τ .

Полученные значения ошибок, при вычислении карты высот методом структурированного света (6 %) из (4) по ошибкам фиксации положения паттерна (рис. 2б) и значения ошибок, полученные по оценкам дифракционного размытия пятна Эйри (5 %) от ПСП из (6), оказались близки по своей величине. Полученные в численном эксперименте с реальным 3D изображением (рис. 7) отклонения при недостаточном количестве полос ПСП, также показали возможность возникновения ошибок того же порядка (5 %). При увеличении числа полос на ПСП до 25 (рис. 6г), величина ошибки, исследованной на рис. 7 снижается. Сама точность восстановления 3D карты высот, судя по результатам рис. 7г, тоже восстанавливается с точностью до 4 %.

Используемый метод представления 3D-объекта, заключающийся в первоначальном его сжатии до глубины меньше λ , последующих операций, в том числе и интегральных преобразований Фурье или Френеля, с последующим возвращением объекту его прежней глубины не только позволяет с достаточной точностью восстанавливать карту высот, но и модулировать искусственно введённую несущую частоту, тем самым восстанавливая и амплитуду и фазу 3D-объекта, получая изображение с заданной глубиной цвета.

Полученные результаты указывают на перспективность предложенного в [3, 6] и развитого в [8] метода восстановления 3D изображений дифракцией на структуре, полученной медианным мультиплицированием полос, восстанавливающей как амплитуду, так и фазу зарегистрированного 3D-объекта, аналогичного методу классической голографии.

Список источников

- [1] **Шойдин, С. А.** Способ дистанционного формирования голографической записи / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // Автометрия. – 2021. – Т. 57. – № 1. – С. 92–102.
<https://doi.org/10.15372/AUT20210110>.
- [2] **Shoydin, S. A.** Transmission of 3D Holographic Information via Conventional Communication Channels and the Possibility of Multiplexing in the Implementation of 3D Hyperspectral Images / S. A. Shoydin, A. L. Pazoev // Photonics. – 2021. – Vol. 8. – № 10. – P. 448–473.
<https://doi.org/10.3390/photonics8100448>.
- [3] **Шойдин, С. А.** Сжатие 3D голографической информации аналогично передаче информации на одной боковой полосе / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев – Текст: непосредственный // Оптический журнал. – 2022. – Т. 89. – № 3. – С. 79–88. – <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-03-79-88>.
- [4] **Lucente, M.** Computational holographic bandwidth compression / M. Lucente // IBM Systems Journal. – 1996. – Vol. 35. – № 3.4. – P. 349–365. <https://doi.org/10.1147/sj.353.0349>.
- [5] **Blinder, D.** Signal processing challenges for digital holographic video display systems / D. Blinder, A. Ahar, S. Bettens, T. Birnbaum, A. Symeonidou, H. Ottevaere, C. Schretter, P. Schelkens // Signal Processing: Image Communication. – 2019. – Vol. 70. – P. 114–130.
<https://doi.org/10.1016/j.image.2018.09.014>.
- [6] **Shoydin, S. A.** Recording a Hologram Transmitted over a Communication Channel on One Sideband / S. A. Shoydin, S. B. Odinkov, A. L. Pazoev, I. K. Tsyganov, E. A. Drozdova // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. – № 23. – P. 11468. <https://doi.org/10.3390/app112311468>.
- [7] Шойдин С. А. Передача 3D голографической информации по радиоканалу / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, Национальный исследовательский университет ИТМО. – 2023. – Т. 23. – № 1. – С. 21–27.
<https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-1-21-27>.
- [8] **Shoydin, S. A.** Structured Light Patterns Work Like a Hologram Shoydin S. A., Pazoev A. L. // Applied Sciences. – 2023. – Т. 13. – № 6. – С. 4037. – <https://doi.org/10.3390/app13064037>.
- [9] **Múnera, N.** Evaluation of fringe projection and laser scanning for 3D reconstruction of dental pieces / N. Múnera, L. Gabriel, J. Garcia-Sucerquia // Dyna (Medellin, Colombia). – 2012. – Vol. 79. – № 171. – P. 65–73. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532012000100008 (дата обращения: 20.06.2023).
- [10] **Schwider, J.** Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources / J. Schwider, R. Burow, K.-E. Elssner, J. Grzanna, R. Spolaczyk, K. Merkel // Applied Optics. – 1983. – Vol. 22. – № 21. – P. 3421–3432. <https://doi.org/10.1364/AO.22.003421>.
- [11] **Creath, K. V.** Phase-Measurement Interferometry Techniques / K. Creath, E. Wolf // Progress in Optics. – 1988. – Vol. 26. – P. 349–393. [https://doi.org/10.1016/S0079-6638\(08\)70178-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6638(08)70178-1).
- [12] **Birch, D. J. S.** Optical shop testing, 2nd edn, Wiley, New York, 1992, ISBN 0-471-52232-5 / D. J. S. Birch, D. Malacara (Ed.) // Advanced Materials for Optics and Electronics. – 1993. – Vol. 2. – № 4. – P. 205.
<https://doi.org/10.1002/amo.860020408>.
- [13] **Котельников, В. А.** О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи – Всесоюзный энергетический комитет // Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности, 1933. Репринт статьи в журнале УФН. – Т. 176. – № 7. – 2006. – С. 762–770.
- [14] **Fadnavis, S.** Image Interpolation Techniques in Digital Image Processing: An Overview / S. Fadnavis // International Journal of Engineering Research and Applications. – 2014. – Vol. 4. – № 10 (Part 1). – P. 70–73. https://ijera.com/papers/Vol4_issue10/Part%20-%201/K41007073.pdf (дата обращения: 20.06.2023).

- [15] **Мори, М.** The Uncanny Valley [From the Field] / М. Mori, К. F. MacDorman, N. Kageki // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2012. – Vol. 19. – № 2. – P. 98–100.
<https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2192811>.
- [16] **Шойдин, С. А.** Эффект «зловещей долины» при передаче голографических изображений (на англ.) / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2022. – № 3. – С. 4–9. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-3-4-9>.

Accuracy of wavefront reconstruction during diffraction on a pattern formed by structured light

S. A. Shoydin, A. L. Pazoev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

The issues of the accuracy of reproduction of the wavefront during light scattering on a pattern formed by structured light laterally illuminating a 3D-object are discussed. The diffraction results obtained in this way are compared with the image of the original 3D-object. In the approximation of the scalar diffraction theory, the results of numerical experiments on light diffraction on different variants of such patterns are shown. The degree of similarity of the reconstructed 3D images and possible reasons for their differences are discussed.

Keywords: Holography, Information transmission, 3D augmented reality, Holographic TV, Structured light.