13. Передача голографической информации супергетеродинированием

С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

В работе приводится способ сжатия 3D голографической информации без недопустимых потерь качества изображения. Показано, что он аналогичен известному в радиотехнике методу супергетеродинирования, или переносу информационных характеристик сигнала на более низкую несущую частоту и заключается в представлении 3D изображения двумя кадрами, один из которых представляет собой топографическую карту поверхности, а другой её текстуру. Указанное представление удобно для динамической передачи 3D кадров по обычным каналам связи в задачах 3D голографического телевидения и дополненной реальности. Приводятся некоторые ограничения, вызванные дискретным представлением голограмм и пути их преодоления.

Ключевые слова: Голография, цифровая голография, интерференция, голографические интерференционные полосы, телескопическая система, проекционная система.

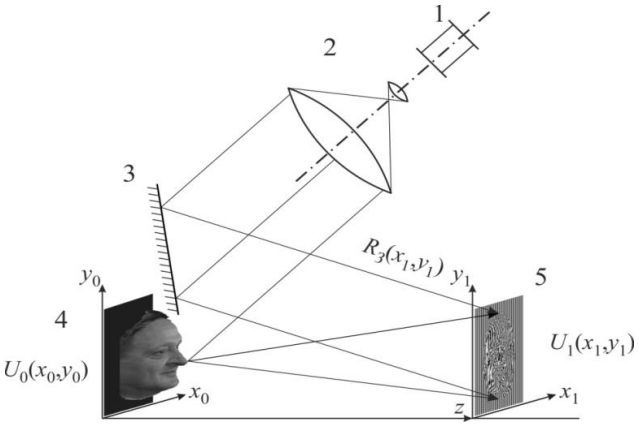
Цитирование: **Шойдин, С. А.** Передача голографической информации супергетеродинированием / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 87–97.

Введение

При передаче информации о голографическом изображении (рисунок 1) традиционно используется вся информация, записанная на голограмме. Однако при этом возникает противоречие между огромными массивами информации, хранящимися в голограмме, и ограниченностью полосы пропускания радиоканалов. Так, в [1] отмечается, что при таком подходе задача создания голографического телевидения просто не имеет решения. Это связано с большой плотностью записи информации на голограммах, которая и оценочно [2] и с учётом оптики записывающей и восстанавливающей оптических систем [3] настолько высока, что при передаче покадрово с телевизионной частотой может достигать терабайт в секунду [4]. Поэтому актуальной задачей является поиск путей сжатия голографической информации без недопустимых искажений. Одному такому способу, как оказалось, имеющему корни в истории радиотехники посвящена настоящая работа.

1. Передача радиосигнала на одной боковой полосе

Типовая схема записи голограмм, представленная на рисунке 1, осуществляет запись аналогового сигнала на несущей частоте, соответствующей основному периоду интерференции объектного и опорного пучка. Период такой интерференционной картины d определяется по формуле Брэгга (1) длинной волны записывающего излучения λ и углом схождения θ объектного и опорного пучков,



1 — лазер, *2* — коллимирующая система, *3* — зеркало, *4* — объект голографирования, *5* — фотоматериал, на котором регистрируется интерференционная картина, образуя голограмму $\tau_г(x_1, y_1)$. $U_1(x_1, y_1)$ — комплексная амплитуда электромагнитной волны, сформированной в объектной ветви, $R_1(x_1, y_1)$ — комплексная амплитуда электромагнитной волны, сформированной в опорной ветви

Рис. 1. Обобщённая схема записи пропускающей голограммы

$$2\,d\sin(\theta/2) = \lambda/n, \tag{1}$$

что при типичных углах схождения порядка 30–60° в воздухе ($n = 1$) соответствует периодам $d \approx \lambda$, а в видимом диапазоне длин волн соответствует периодам меньше микрометра. В соответствии с теоремой отсчётов Котельникова для передачи такого сигнала по цифровым каналам необходимо брать отсчёты с частотой в два раза превышающей частоту регистрируемого таким образом на голограмме сигнала.

Для двумерного сигнала это по 4 отсчёта (как минимум «одинарной точности») на каждый сегмент голограммы с ребром, равным длине волны записи λ. Видно, почему при цифровизации голограммы образуются сверхбольшие массивы данных.

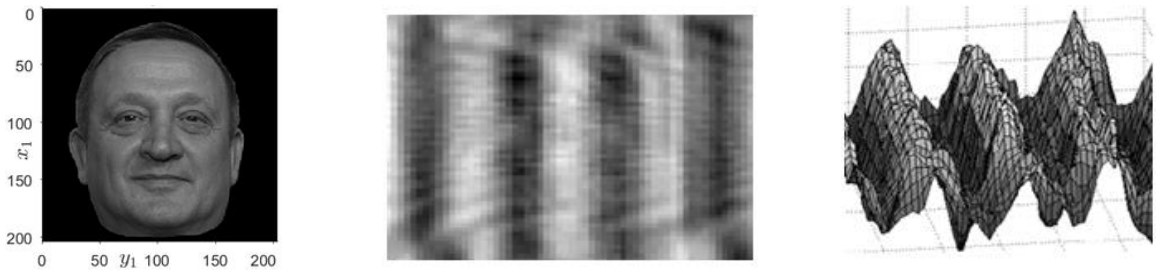
Формальная запись голографического сигнала [5] показывает, что на голограмму $\tau_г(x_1, y_1)$ записываются пространственные частоты, образованные сложением комплексной амплитуды объектного и опорного пучков (2).

$$\tau_г(x_1, y_1) = |\,U_о(x_1, y_1) + R_з(x_1, y_1)\,|^2 \tag{2}$$

Спектр пространственных частот сигнала, сформированного реальным объектом на голограмме, выглядит как на рисунок 2.

На рисунках 2*б* и 2*в* отчётливо просматривается периодическая синусоидальная решётка, образованная интерференцией объектной и опорной волны, какую мы видим в классических интерферометрах. Также видно, что модуляция этой несущей сложным сигналом объектного пучка приводит к сравнительно небольшим её искажениям, что указывает на сравнительно малую степень влияния дифракции света на объекте голографирования. По виду $\tau_г(x_1, y_1)$. Можно догадаться, что гармоники, несущие информацию об объекте голографирования, лишь немного корректируют основную гармонику несущей пространственной частоты.

$$U_1(x_1, y_1) = U_о(x_1, y_1)\exp[\varphi(x_1, y_1)]. \tag{4}$$



а) Объект

б) Пространственные частоты на голограмме

в) Распределение интенсивности интерференционной картины, записываемой на голограмме $\tau_г(x_1,y_1)$

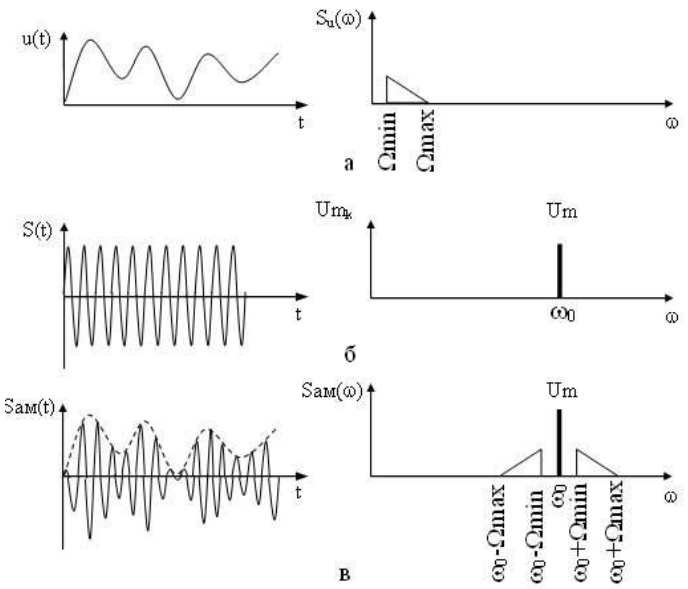
Рис. 2. Запись голограммы реального объекта

Амплитудная $U_o(x_1, y_1)$ прямо влияет на видность интерференционных полос на площади голограммы, а также на появление новых гармоник, соответствующих изменению амплитуды в кадре (x_1, y_1). Фазовая модуляция $\varphi(x_1, y_1)$, складываясь, или вычитаясь с фазой опорной волны в (2) приводит к смещению интерференционной полосы, аналогично рисунку 4, что также приводит к появлению новых разностных гармоник. Это похоже на одномерные случаи амплитудного (рисунок 3) и фазового (рисунок 4) кодирования, соответственно.

В то же время, при восстановлении минус первого порядка дифракции восстановленная волна $U_1(x_1, y_1)$ записывается в виде (3)

$$U_1(x_1, y_1) = U_o(x_1, y_1)\, I_r(x_1, y_1), \tag{3}$$

где I_r — интенсивность опорного пучка. В этом выражении уже отсутствуют высокочастотные гармоники несущей интерференционной картины, которая нужна лишь для того, чтобы восстанавливающий пучок продифрагировал на нужный угол, восстанавливая объектную волну. Здесь интенсивность опорного пучка при записи голограмм стараются сделать как можно слабо изменяющейся по полю голограммы, а объектный пучок также не имеет пространственных частот, сравнимых с несущей частотой. Это ясно хотя бы из того, что для адекватной передачи изображений, сформированных волной $U_1(x_1, y_1)$ вполне достаточно фотографического, или телевизионного разрешения. Например, современный стандарт телевизионного кадра Full HD (Full High Definition) соответствует разрешению 1920×1080 точек (пикселей) на весь кадр, что на экране с диагональю 24 дюйма (609 мм) формирует сигнал с максимальной пространственной частотой 1920/530 = 3,6 лин./мм, что более чем на 3 порядка ниже, чем полученная выше по (1) оценка периода несущей частоты голограммы ($d \approx \lambda$). Возникает такая же ситуация как с передачей сигнала по радиоканалу. Несущая ω_0 в радиодиапазоне высокая (рисунки 3 и 4), а огибающая, представляющая собой суперпозицию сигнала модуляции, занимающая полосу от Ω_{min} до Ω_{max} — низкая. Отличие только в том, что в радиосигнале частоты временные и одномерные, а в голографии — двумерные и пространственные. Но в целом, диапазон частот, который занимает модулирующий сигнал, несущий полезную информацию,



а — информационный сигнал со спектром от от Ω_{min} до Ω_{max}, сформированный для передачи по радиоканалу; *б* — спектр синусоидального несущего сигнала; в — результат амплитудной модуляции несущей частоты информационным сигналом.

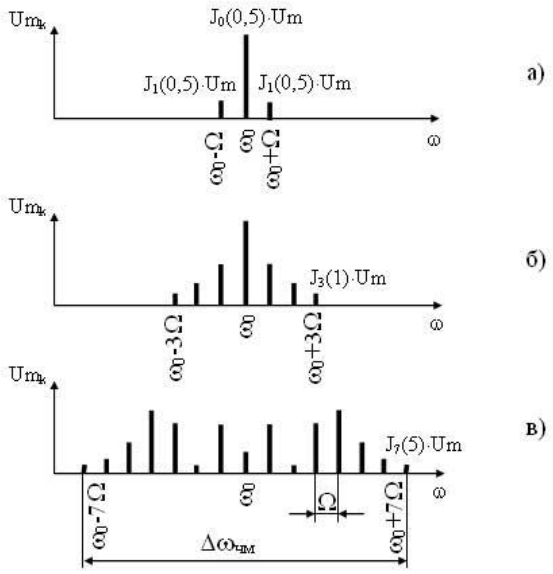
Рис. 3. Амплитудная модуляция

как для случая с амплитудной модуляцией (рисунок 3), так и с фазовой (рисунок 4) существенно меньше, чем весь передаваемый. Также, энергия в боковой полосе при амплитудной модуляции много меньше энергии в несущей. Не случайно, в радиотехнике значительных результатов удалось достичь при передаче сигнала «на одной боковой полосе» [6]. Такой метод снижения избыточности в передаваемом сигнале применим и в случае амплитудной модуляции (рисунок 3) и в случае фазовой модуляции (рисунок 4). Ещё большая аналогия между кодированием на одной боковой полосе просматривается при сравнении записываемого на голограмму сигнала и сигнала, используемого для амплитудной и фазовой модуляции. Действительно, комплексная амплитуда записываемого на голограмму сигнала (3) имеет и амплитудную и фазовую составляющую (4).

На рисунке 3*а* приведён одномерный информационный сигнал, описываемый действительной функцией $U(t)$ и его спектр $S_u(\omega)$, зажатый между максимальной Ω_{max} и минимальной Ω_{min} частотой.

На рисунок 3*б* — несущая и её спектр, на рисунок 3*в* — результат амплитудной модуляции несущей информационным сигналом. Из рисунка 3*в* видно, что область частот, содержащих информацию о сигнале, обычно лежит в диапазоне частот шириной $2\Omega_{max}$, а при передаче одной боковой полосы только в диапазоне частот $\Omega_{max} - \Omega_{min}$.

На рисунке 4 приведены несколько случаев, поясняющих форму возникающего спектра при фазовой модуляции сигнала простейшей синусоидой. При наличии в сигнале нескольких гармоник, как это бывает в реальных сигналах, положение функций Бесселя первых и более порядков размывается на весь диапазон частот модулирующего сигнала.



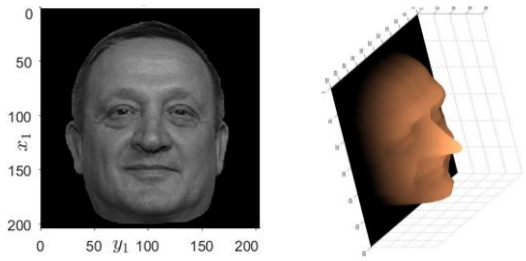
а — спектр сигнала с несущей частотой ω_0, промодулированного модельным синусоидальным информационным сигналом с частотой Ω, определяемого функцией Бесселя нулевого порядка J_0 и двух плюс-минус первых порядков информационного сигнала, определяемых функцией Бесселя первого порядка J_1, соответствующих в голографии плюс-минус первым порядкам дифракции; *б* — спектр сигнала, сформированного для передачи по радиоканалу с несущей частотой ω_0 и учётом двух положительных и двух отрицательных порядков дифракции, соответствующих функциям Бесселя первого J_1 и второго J_2 порядков; *в* — спектр сигнала, сформированного для передачи по радиоканалу с несущей частотой ω_0 и учётом семи положительных и семи отрицательных порядков дифракции, соответствующих функциям Бесселя от первого J_1 до седьмого J_7 порядков.

Рис. 4. Фазовая модуляция

В голографии наличие дифракции первых порядков соответствует записи в объёмных материалах, когда выполняются условия дифракции Брэгга, т. е. когда параметр Клейна [7] $Q \geqslant 10$. Когда параметр Клейна меньше, выполняются условия дифракции Рамана-Ната и возникает много порядков дифракции, описываемых функциями Бесселя соответствующих порядков. И в том и в другом случае полезный информационный сигнал лежит в диапазоне частот, соответствующих вариациям амплитуды $U_1(x_1, y_1)$ и фазы $\varphi(x_1, y_1)$ записываемого на голограмму изображения. Т. е., чтобы передать информацию о голограмме совсем не обязательно передавать информацию, включающую информацию о несущей. Этот подход был использован в [8].

2. Разложение оптического сигнала, формируемого объектом голографирования на амплитудную и фазовую составляющие

В [8] был предложен способ передачи голографической информации о 3D объекте, представляющий развитие представлений о записи 3D объекта [9] как сигнала с пространственным двумерным представлением действительной амплитуды $U_1(x_1, y_1)$ и синхронизованной с ней фазой $\varphi(x_1, y_1)$ волны, описывающей отставание или опережение волны в каждой из заданных точек. Этот способ несколько отличается от более ранних работ [10], использующих представления о голографируемом объекте как о материальной 3D структуре. В [8,9] используется



а) Текстура *б*) Маска

Рис. 5. 3D модель голографируемого объекта

а) Объект со спроектированными на него полосами

б) Система сдвиговых полос для определения топографии маски

Рис. 6. Проекция полос на 3D объект голографирования

представление о 3D объекте голографирования, как об объекте, состоящем из 3D маски, описываемой фазой волны $\varphi(x_1, y_1)$ и покрывающей её текстуре поверхности $U_1(x_1, y_1)$. Это позволило создать 3D модель голографируемого объекта, эквивалентную (4) и оцифровать её.

На рисунке 5*а* приведена текстура поверхности, а на рисунке 5*б* — 3D маска объекта. Текстура получается с помощью обычной цифровой фотографической технологии и сохраняется в любом из доступных форматов. Маска создаётся любым из возможных способов формирования массивов данных о топографии 3D объекта. Им может быть как лазерное сканирование объекта, так и проекция муаровых, или интерференционных полос, или любой другой способ создания топографической карты объекта голографирования. Нами был выбран метод проекции полос (рисунок 6).

Сканированием по горизонтали кадра рисунка 6*б* была получена карта глубины объекта.

Из рисунке 6*б* видно, что количество полос невелико, видно даже что их существенно меньше, чем вертикальных столбцов, передающих изображение на рисунке 6*а*, однако их количества вполне достаточно для адекватной передачи объёмного изображения 3D объекта рисунока 7.

На рисунке 7*а* показан горизонтальный параллакс восстановленного по ним 3D изображения, а на рисунке 7*б* — вертикальный. Это доказывает наличие переданной по каналу 3D модели объекта. По синтезированной 3D модели объекта можно создавать голографическую структуру, эквивалентную голограмме, причём на любой несущей частоте.

Для этого достаточно выполнить операции, описывающие процесс, изображённый на рисунке 1 и в формулах (2) и (3). В целом, количество передаваемой голографической информа-

а) Горизонтальный параллакс

б) Вертикальный параллакс

Рис. 7. Проекции восстановленного 3D изображения

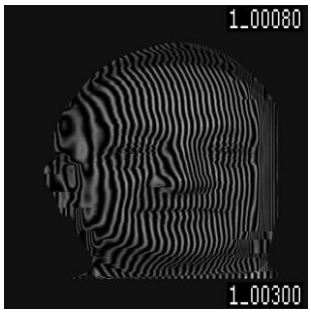
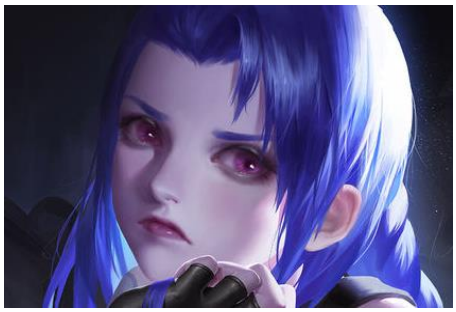


Рис. 8. Структура голографической решётки, соответствующая голограмме, записанной в радиодиапазоне излучением с $\lambda \approx 3$ мм

ции о 3D объекте незначительно превышает фотографическую. Можно даже сказать, что передаваемая информация об объёме 3D объекта сравнима по объёму со служебной информацией, обеспечивающей вид кодирования (jpg, png и др.), передаваемой вместе с каждым кадром.

На рисунке 8 приведена синтезированная голограмма, эквивалентная записанной на длине волны примерно 3 мм, что соответствует излучению в 100 ГГц, т. е. в терагерцовом диапазоне электромагнитного спектра. Изменение несущей соответствует известной в радиотехнике операции супергетеродинирования [11], когда первичный высокочастотный радиосигнал преобразуется к промежуточной частоте для лучших условий его усиления, а уже потом, после усиления, из него детектируется полезный сигнал, промодулировавший в передатчике высокочастотную несущую. Простота, с которой в предложенном способе можно синтезировать голограммы для восстановления на любой доступной длине волны, позволяет надеяться на его широкое распространение в ряде практических задач, как например, в задаче комплексирования многоспектральных изображений [12], но уже в 3D варианте. Действительно, предложенный способ позволяет передавать голографическое изображение на приёмный конец канала, не занимая сколь-нибудь значимый спектральный диапазон, что даёт основание надеяться на его использование также и при создании систем голографического телевидения



а) По технологии аффинных преобразований треугольников (Джинкс из компьютерной игры League of Legends)

б) По технологии передачи сигнала на одной боковой полосе (выделение из сигнала отдельно маски и отдельно текстуры объекта)

Рис. 9. Кадры из 3D видео

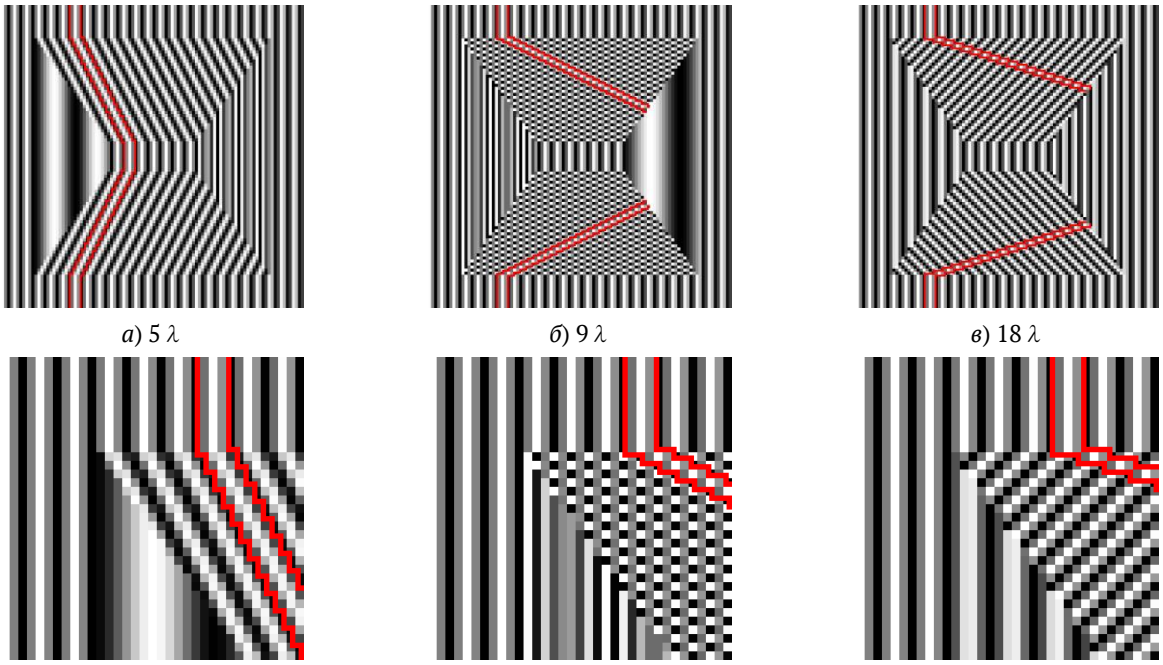
[1] и даже шире — систем дополненной реальности [13]. Передача 3D информации путём её разделения на маску и текстуру поверхности, эквивалентная выделению одной боковой полосы при кодировании радиосигнала, позволяет более эффективно сжимать 3D информацию, чем развивающиеся сегодня на основе патента [14] методы трёхмерных аффинных преобразований треугольников, покрывающих 3D поверхность [15].

На рисунке 9 показано одно из достижений 3D видео, синтезированного в технологии аффинных преобразований. Кукольное лицо легко отличается от лица живого человека.

3. Проблемы формирования материальных голограмм по их 3D компьютерной модели

Одна из проблем синтеза голограммы связана с необходимостью формирования голограммы как материального объекта по имеющейся на приёмном конце канала связи полной информации о 3D модели объекта, как это было показано выше. Проблема создания материальной модели голограммы голографическим дисплеем известна давно и решалась разными способами в разных компаниях. Первым дисплеем можно считать голограмму Денисюка [16], однако она записывалась аналоговым способом с использованием материального голографируемого объекта. В системах дополненной реальности синтезировать материальную голограмму необходимо по его виртуальному образу, поскольку реального объекта может и не быть. При этом существенными являются ограничения разрешающей способности системы записи голограммы [17], выражающиеся в ограничении диапазона углов дифракции восстановленной волны и даже к появлению ложных изображений [18]. В цифровых голограммах смещение строк синтезированной интерференционной картины на величину большую, чем полпериода дифракционной решётки может приводить как к деструкции интерференционных полос (рисунок 10) так и к возникновению ложных. Так, на рисунке 10 показана синтезированная голографическая структура прозрачной пирамиды.

Видно, что с ростом высоты пирамиды интерференционные полосы, образующие голограмму, сдвигаются. Причём, сдвиг строк на полпериода разрушает голографическую дифракционную решётку, а увеличивающиеся далее сдвиги приводят к возникновению интерферен-



а) 5 λ *б*) 9 λ *в*) 18 λ

г) Увеличенный левый верхний фрагмент голограммы (*а*) *д*) Увеличенный левый верхний фрагмент голограммы (*б*) *е*) Увеличенный левый верхний фрагмент голограммы (*в*)

Рис. 10. Голограмма объекта — прозрачная пирамида разной высоты

ционных полос, которые меняют наклон, что соответствует замене в восстановленном изображении пирамиды на перевёрнутую. На приведённом примере видно, что для того, чтобы интерференционные полосы подобным образом не разрушались, высота синтезированной пирамиды не превышала половины её основания. Точнее, градиент высоты синтезируемого голографируемого объекта не должен превышать 45°.

Также, следует избегать обрыва интерференционных полос, приводящих при восстановлении голограммы к возникновению вихревых пучков [19].

Синтез таких голограмм с записанными на них глубокими 3D изображениями представляет определённые трудности [4], однако в оптике есть методы увеличения глубины восстанавливающего изображения. Один из них — применение телецентрической системы [20], в которой продольное увеличение в обычных условиях равно квадрату поперечного.

Таким образом, можно формировать увеличенное по глубине 3D изображение. Если необходимо с помощью телецентрической системы сформировать изображение, с размерами, пропорциональными исходному, необходимо при синтезе голограммы заложить непропорциональное уменьшение размеров объекта, а показанные на рисунке 11 деформации проекции можно устранить коррекцией как параметров самой телескопической системы, так и заранее рассчитанной коррекцией волнового фронта [21], как объектной, так и опорной волны на этапе синтеза голограммы 3D объекта.

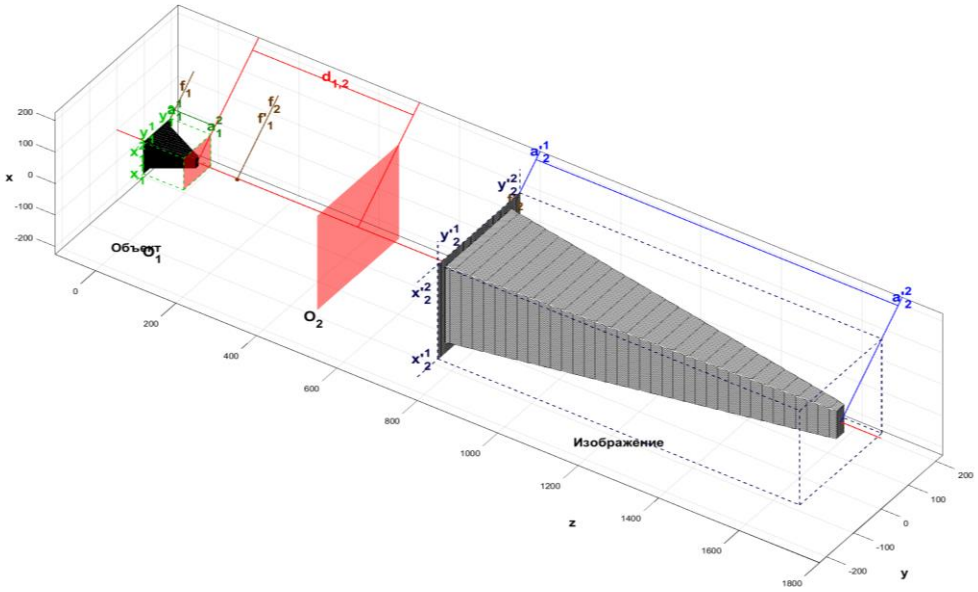


Рис. 11. Проекция 3D голографического изображения пирамиды высотой $a_1^1 - a_1^2$ телецентрической системой $O_1 - O_2$ в искажённую пирамиду с увеличенной глубиной $a'^1_2 - a'^2_2$

Заключение

Предложенный в работе способ формирования полноценного 3D сигнала, пригодный для передачи по обычным каналам связи в динамическом режиме был подтверждён рядом численных экспериментов. Показана применимость способа для решения задач 3D голографического телевидения и дополненной реальности. Обозначены основные ограничения, связанные с дискретным представлением информации о 3D объекте голографирования и предложены пути их преодоления методами проекционной оптики.

Список источников

[1] **Рапопорт, Б. И.** Возможности передачи голографического изображения малокадровой телевизионной системой // Техника кино и телевидения. — 1971. — №9. — С. 42.

[2] **Hill, B.** Some Aspects Of A Large Capacity Holographic Memory // Applied Optics. — 1972. — Vol. 11. — №1. — P. 182–196.

[3] **Shoydin, S. A.** Holographic Memory Without Reference Beam // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). — 2016. — Vol. 25. — №4. — P. 262–267.

[4] **Шойдин, С. А.** Влияние аберраций оптики на плотность записи голографической информации // Национальная конференция с международным участием «СибОптика-2020. Актуальные вопросы высокотехнологичных отраслей». Сборник статей (в печати)

[5] **Шойдин, С. А.** Методы оптической обработки информации. — Новосибирск: СГГА, 2008. — С. 31.

[6] **Клюев, В. Ф.** Исследование амплитудной модуляции. — Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский университет им. Н. И. Лобачевского, 2015. — 25 С.

[7] **Klein, W. R.** Theoretical Efficiency of Bragg Devices // Proc. of IEEE. — Vol 54. — 1966. — P. 803–804.

[8] **Патент 2707582 РФ.** Способ дистанционного формирования голографической записи / С. А. Шойдин. — Опубл. 28.11.2019.

[9] **Шойдин, С. А.** Моделирование дифракции на 3D объектах в среде Матлаб // ГЕО-Сибирь-2012. — Том 4. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника. Ч. 1: сб. матер. IV Междунар. Конференции. — С. 144–148.

[10] **Krivenkov, B. E.** Fraunhofer diffraction by volumetric bodies constant thickness / B. E. Krivenkov, Yu. V. Chugui // Journal of the Optical Society of America A. — USA. — 1989. — Vol 6. — № 5. — P. 617–626.

[11] **Вовк, Ю. В.** Параллельное гетеродинное считывание двоичных данных из одномерных голограмм Фурье / Ю. В. Вовк, Ю. А. Щепеткин // Автометрия. — 1984. — № 3. — С. 35–42.

[12] **Васильев, А. С.** Методы комплексирования изображений в многоспектральных оптико-электронных системах / А. С. Васильев, А. В. Трушкина // Труды 26-й Международной конференции (GraphiCon2016). — 2017. — С. 314–318.

[13] **Яковлев, Б. С.** Классификация и перспективные направления использования технологии дополненной реальности / Б. С. Яковлев, С. И. Пустов // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2013. — Вып. 3. — С. 484–492.

[14] **Патент 2006/0187297 US.** Holographic 3-D Television / Levent Onural. — Опубл. 24.08.2006.

[15] **Zhang, Y.-P.** Fast generation of full analytical polygonbased computer-generated holograms / Y.-P. Zhang, F. Wang, T.-C. Poon, S. Fan, W. Xu // Optics Express. — 2018. — Vol. 26. — № 15. — P. 19206–19224.

[16] **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.

[17] **Полещук, А. Г.** Прямая лазерная запись в плёнках хрома полутоновых микроизображений с большим динамическим диапазоном / А. Г. Полещук, В. П. Корольков, А. Г. Седухин, А. Р. Саметов, Р. В. Шиманский // Автометрия. — 2015. — Том 51. — № 3. — С. 87–93.

[18] **Шойдин, С. А.** Преобразование Френеля в моделировании голограмм / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // Интерэкспо Гео-Сибирь-2018. Новосибирск. — 2018. — С. 95–98.

[19] **Волостников, В. Г.** Методы анализа и синтеза когерентных световых полей. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2014. — 254 с.

[20] **Жимулёва, Е. С.** Разработка телецентрических объективов для систем размерного контроля / Е. С. Жимулёва, П. С. Завьялов, М. С. Кравченко // Автометрия. — 2018. — Том 54. — № 1. — С. 61–70.

[21] Венедиктов, В. Ю. Голографические датчики волнового фронта // Фотоника. — 2016. — № 1. — Том 55. — С. 132–143.