

ПРОБЛЕМЫ ЦИФРОВОГО СИНТЕЗА ГОЛОГРАММ: НА ПРИМЕРЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФРЕНЕЛЯ И СТРУКТУРЫ ГОЛОГРАММЫ ПРОЗРАЧНОЙ ПРИЗМЫ

Сергей Александрович Шойдин

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

Артем Леонович Пазоев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)291-00-92, e-mail: shoydin@ssga.ru

Анализируются проблемы цифрового синтеза голограмм, связанные с большими объемами содержащейся в них информации, и обусловленные этим трудности дискретизации и выполнения интегральных преобразований массивов данных. Обсуждаются способы преодоления указанных проблем и приводятся некоторые примеры. Показано возникновение ложных интерференционных полос, связанное с дискретизацией сигналов, и предложены пути увеличения скорости вычисления преобразования Френеля за счет использования некоторых видов симметрий при вычислении ядра преобразования.

Ключевые слова: лазер, голография, интерференция, информация.

PROBLEMS OF DIGITAL HOLOGRAMS SYNTHESIS DUE TO MASS DATA

Sergey A. Shoydin

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

Artem L. Pazojev

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

The problems of digital synthesis of holograms due to big data and integral calculations of mass data are analyzed. Methods and algorithms are discussed and some examples of how to overcome these problems are given. A method of using symmetry in the cores of the Fresnel integral transform to reduce the amount of computation is proposed. Examples of the appearance of bands in a hologram arising from the discrete representation of the frame are given, and limitations that prevent their appearance are proposed.

Key words: laser, holography, interference, big data.

Введение

Практически сразу после появления первых работ по голографии [1] исследователи стали обращать внимание на большие потенциальные возможно-

сти голограмм для хранения информации. В работах [2, 3] были предложены первые оптические схемы предназначенных для этого голографических запоминающих устройств (ГЗУ), что дало сильный импульс к широким исследованиям в этой области [4–7], продолжающимся и сегодня [6, 7].

Однако, с появлением в голографии цифровых технологий [7–11] стало ясно, что большие данные, хранящиеся в физических голограммах, являются источником другой проблемы, связанной с созданием виртуальных аналогов таких голограмм и их передач по каналам связи.

Действительно, для изобразительной голограммы размером А4 (210 × 297 мм) количество записанной на нее информации с учетом цветной передачи полутонных 3D изображений оценивается [12] как 10^{11} байт. Для современных сетей со скоростью 4G (1 Гбит/с) передача такой голограммы займет около 10 минут. Для сетей будущего [13] со скоростью передачи данных 5G (до 100 Гбит/с) – около 0,1 минуты. Такие результаты убивают саму идею голографического кино и телевидения, для реализации которых (передачи трех цветов с частотой 25 кадров в секунду плюс служебная информация) потребуются сети со скоростью порядка 10 Тбит/с. Это практически перекрывает весь доступный радиодиапазон, включающий все эфирные радио и телепередачи. Хотя для просмотра аудиторией из четырех человек голографическое кино с носителем на пленке высокого разрешения было создано [14], но для телевидения эта технология неприемлема. Поэтому сегодня особо актуальны любые усилия по ускорению процессов обработки таких больших массивов информации, часто именуемых «большими данными».

Алгоритм расчета голограмм

На рис. 1 изображена схема записи пропускающих голограмм [15], в которой объектный пучок формируется объектом $U_0(x_0, y_0)$, находящимся на расстоянии z от плоскости регистрации голограммы (x_1, y_1) . В этой плоскости комплексная амплитуда электромагнитного светового поля $U_1(x_1, y_1)$, описываемая преобразованием Френеля, складывается с полем опорной волны $R_3(x_1, y_1)$. Интерференционное поле, формируемое в плоскости 5, регистрируется фотоприемным устройством, которым может служить как фотографический материал, так и матрица фотоприемников, и поэтому регистрируется уже не амплитуда, а распределение интенсивности $|U_1(x_1, y_1)|^2$ по полю голограммы.

Согласно основной формуле голографии [16], амплитуда восстановленного голограммой изображения $U_B(x_1, y_1)$ описывается (1) комплексной двумерной функцией

$$U_B(x_1, y_1) = U_1(x_1, y_1) \cdot R_B(x_1, y_1) \cdot R_3^*(x_1, y_1), \quad (1)$$

где $R_B(x_1, y_1)$ – комплексная амплитуда восстанавливающей волны, а $R_3^*(x_1, y_1)$ – амплитуда комплексно сопряженной опорной записывающей волны.

Следовательно, операция восстановления голограммы может быть описана как простое произведение матриц комплексных чисел. Однако в реальности голограмма представляет собой зафиксированный на фотоносителе квадрат модуля суммы амплитуд объектного и опорного пучков, т. е. распределение:

$$\tau(x_1, y_1) = \left| U_1(x_1, y_1) + R_3^*(x_1, y_1) \right|^2. \quad (2)$$

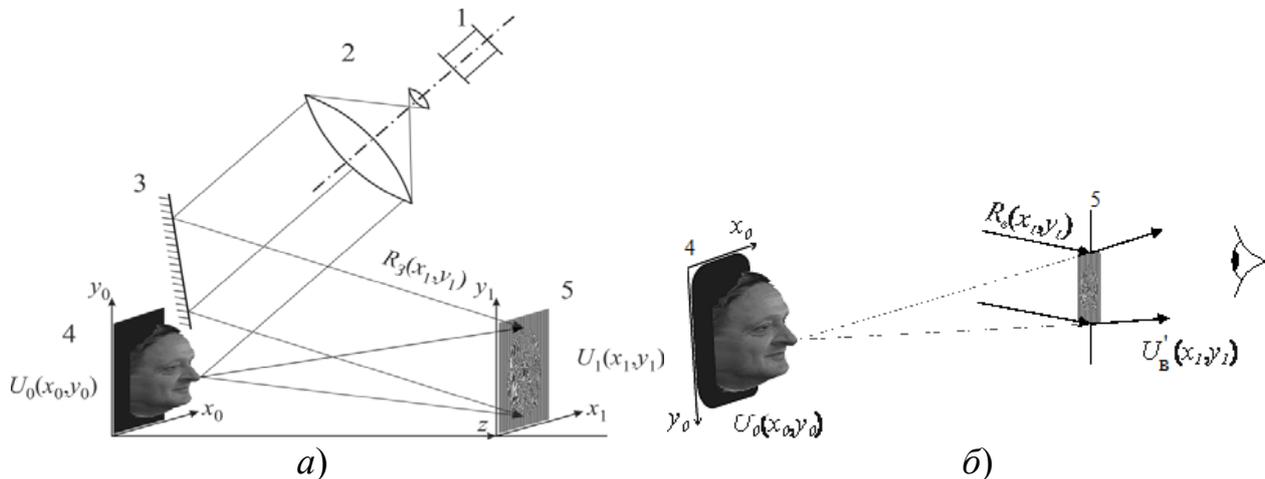


Рис. 1. Схема записи пропускающих голограмм:

а) обобщенная схема записи пропускающей голограммы: 1 – лазер, 2 – коллимирующая система, 3 – зеркало, 4 – объект голографирования, 5 – фотоматериал, на котором регистрируется интерференционная картина, образуя голограмму, *б)* обобщенная схема восстановления пропускающей голограммы, где восстанавливающий пучок R_B освещает голограмму 5, восстанавливая амплитуду поля $U'_B(x_1, y_1)$

В результате голограмма содержит сумму всех порядков дифракции $U'_B(x_1, y_1)$, из которых только один представлен в выражении (1). Для случая линейного фотоотклика имеют место три основных порядка:

$$U'_B(x_1, y_1) = \tau(x_1, y_1) \cdot R_B(x_1, y_1) = (I_1 + I_3) \cdot R_B(x_1, y_1) + U_1(x_1, y_1) \cdot R_3^*(x_1, y_1) \cdot R_B(x_1, y_1) + U_1^*(x_1, y_1) \cdot R_B^*(x_1, y_1) \cdot R_3(x_1, y_1). \quad (3)$$

Здесь $I_1 = |U_1(x_1, y_1)|^2$ и $I_3 = |R_3(x_1, y_1)|^2$ – интенсивности объектного и записывающего пучков соответственно. Первый член суммы (3) создает волну, которая распространяется в направлении восстанавливающего пучка $R_B(x_1, y_1)$, второй, представляющий собой -1 порядок дифракции, при $R_B = R_3$ пропорционален комплексной амплитуде записанного объектного пучка и распространяется в том же направлении, что и объектный при записи. Он чаще всего представляет наибольший интерес. Однако в плоскости голограммы они все совмещены,

т. е. наложены друг на друга. Разделение пучков света происходит при распространении вдоль z , когда их волновые фронты расходятся за счет наклона между направлением распространения объектного и опорного пучков. Это также представляет трудность при моделировании восстановления голограмм, так как для вычисления комплексной амплитуды восстановленного голограммой оптического сигнала на расстоянии от плоскости голограммы необходимо вычислять преобразование Френеля от всей суммы (3), определяя в процессе вычислений плоскость, в которой второй член суммы пространственно разделится с первым и третьим. Следует отметить, что такое разделение бывает не всегда, а только при определенных параметрах расходимости объектного и опорных пучков и опорных пучков записи и восстановления, а также всех углов между ними.

Таким образом, для правильного моделирования процессов записи и восстановления голограмм требуется дважды совершать преобразование Френеля над большими массивами порядка $\cdot 10^{11}$ комплексных чисел двойной точности, которыми представляются волновые фронты объектного, опорного записывающего и опорного восстанавливающего пучков. Задачи настоящего исследования заключались в поиске путей увеличения скорости интегрального преобразования Френеля и моделировании процесса цифровой записи голограмм. Что касается восстановления таких голограмм, то они вынесены за рамки настоящей работы.

Быстрое преобразование Френеля

Классическое выражение для вычисления преобразования Френеля имеет вид (9). Оно представляет собой свертку двумерного комплексного сигнала $U_0(x_0, y_0)$ с двумерным комплексным ядром такого преобразования.

$$U_1(x_1, y_1) = \frac{e^{i \cdot k \cdot z}}{i \cdot \lambda \cdot z} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int U_0(x_0, y_0) \cdot e^{\frac{i \cdot k}{2 \cdot z} \cdot ((x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2)} dx_0 dy_0. \quad (4)$$

Здесь $U_0(x_0, y_0)$ – комплексная амплитуда излучения, сформированного объектом, а $U_1(x_1, y_1)$ – ее образ Френеля, λ – длина волны излучения, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, z – расстояние от объекта до плоскости наблюдения.

Ядром преобразования является подынтегральная экспонента в формуле (4):

$$\theta_{Fresnel}(x_0, y_0, x_1, y_1) = e^{\frac{i \cdot k}{2 \cdot z} \cdot ((x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2)}. \quad (5)$$

Оценив, согласно (3), количество информации для голограммы портрета человека примерно в 100 ГБ, мы должны обеспечить не меньший объем оперативной памяти в вычислительном устройстве, а с учетом вычислительного процесса и того больше. При этом свертка изображения $U_0(x_1, y_1)$ с ядром (5) требу-

ет и высокого быстродействия системы, поскольку отражает процесс перемножения с последующим суммированием каждого комплексного числа матрицы $U_0(x_0, y_0)$ с каждым из комплексных чисел ядра преобразования Френеля (5). Дискретное представление такого выражения [17–20] имеет следующий вид:

$$U_1(n_1, m_1) = \frac{e^{i \cdot k \cdot z}}{i \cdot \lambda \cdot z} \sum_{n_1, m_1} \sum_{n_0, m_0} U_0(n_0, m_0) \cdot \theta_{Fresnel}(n_0, m_0, n_1, m_1), \quad (6)$$

где $U_1(n_1, m_1)$ и $U_0(n_0, m_0)$ – комплексные числа значений двумерных комплексных функций $U_1(x_1, y_1)$ и $U_0(x_0, y_0)$ в точках плоскости (x_1, y_1) и (x_0, y_0) соответственно, а ядро преобразования Френеля (ПФр) можно представить в следующем виде:

$$\theta_{Fresnel}(n_0, m_0, n_1, m_1) = e^{\frac{i \cdot k}{2 \cdot z} \left((\Delta x_1 \cdot n_1 - \Delta x_0 \cdot n_0)^2 + (\Delta y_1 \cdot m_1 - \Delta y_0 \cdot m_0)^2 \right)}. \quad (7)$$

Ввиду сложности таких вычислений для указанных выше больших массивов данных часто пользуются известным алгоритмом быстрого преобразования Фурье (БПФ) [21, 22], однако большое количество операций, связанных с переводом вычислений от ядра ПФр к БПФ и обратно существенно осложняет процесс вычислений.

На рис. 2 приведены результаты ускоренного расчета преобразования Френеля реального портретного изображения, на котором видно, что не всегда требуется доводить численный расчет до конца, а иногда достаточно выбрать случайным образом некоторое большое количество точек в плоскости объекта или в плоскости его образа Френеля и им ограничиться. Преобразование совершается быстрее, но необходимо понимать, что такое ускорение связано с частичной потерей информации об объекте.

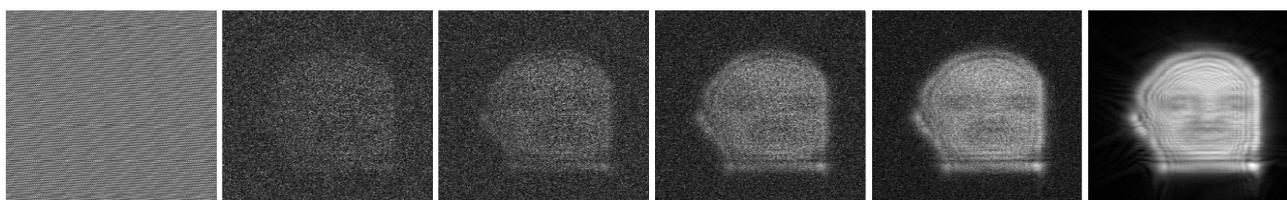


Рис. 2. Слева направо: образ Френеля при увеличении количества (1 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 %) просуммированных ядер (7) в сумме (6)

Следующим шагом (рис. 3) является использование симметрий в ядре (7). Видно, что в нем выражения в показателе экспоненты стоят в квадрате. Следовательно, на комплексное значение ядра (7) влияет разница между n_1 и n_0 , m_1 и m_0 а не их абсолютные значения. Для ускорения процесса вычисления были использованы симметрии, позволившие в 4 раза сократить объем вычислений за счет разбиения матрицы входного изображения на 4 равных сегмента.

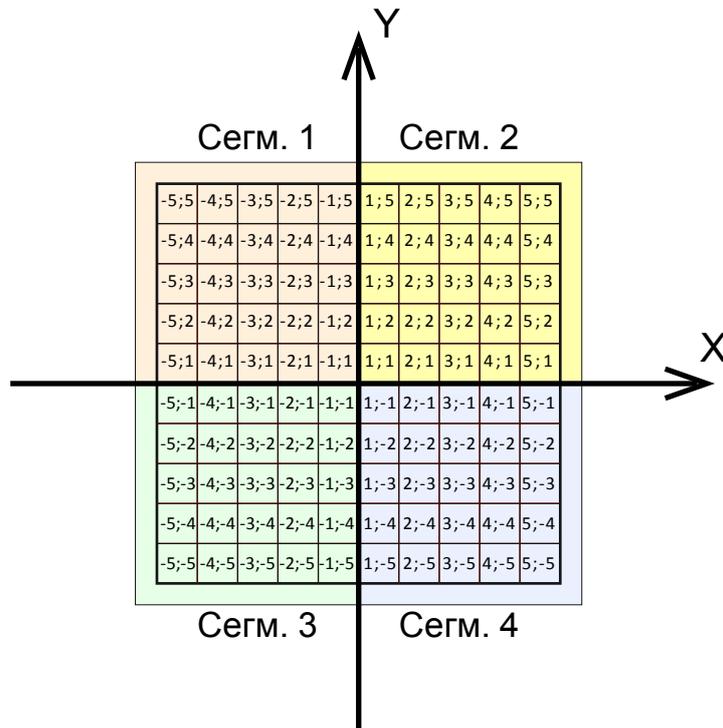


Рис. 3. Схема разделения координатной сетки объекта на 4 сегмента, цветом выделены области, принадлежащие разным сегментам

Проведенные по каждому отдельному сегменту вычисления с последующим суммированием позволили более чем в 2,37 раза ускорить преобразование Френеля при идентичности полученных результатов и эксперимента. На рис. 4 приведено совмещенное изображение дифракции Френеля от щели шириной 2 мм на расстоянии $z = 1$ м для *He-Ne* лазера с длиной волны $\lambda = 0,63$ мкм.

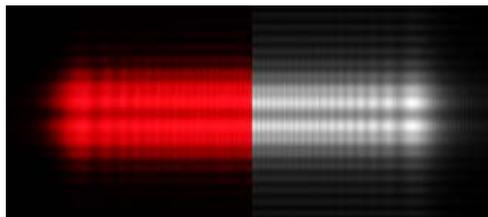


Рис. 4. Результаты эксперимента по формированию образа Френеля слева (красным), результаты расчета по предложенной методике справа (белым)

Слева (красный цвет) – результат эксперимента, справа – расчет по указанному алгоритму. Видно хорошее совпадение экспериментальных результатов с полученными расчетом по предложенной методике ПФр, которое далее будем называть быстрым преобразованием Френеля (БПФр).

На рис. 5, а, б приведены результаты прямого ПФр портрета размером по 400 точек n_0, n_1, m_0, m_1 по формуле (6) и БПФр того же самого портрета.

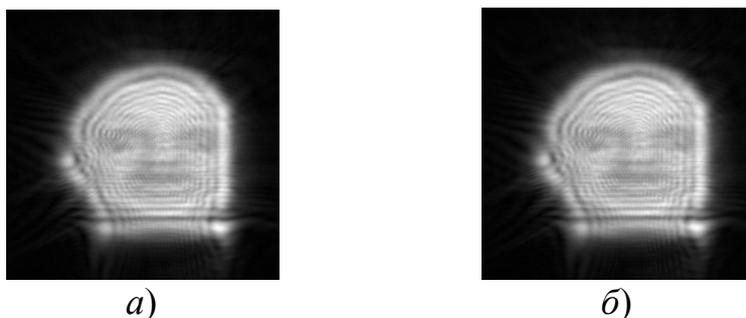


Рис. 5. Образ Френеля в случаях:

а) классического преобразования Френеля по формуле (6) и б) быстрого преобразования Френеля с использованием двух симметрий ядер согласно (7) соответственно по горизонтали и вертикали

На рис. 6 приведены экспериментальные замеры активности процессора, произведенные с использованием диспетчера задач. Слева при вычислении ПФр (рис. 5, а) и БПФр (рис. 5, б) видно, что ускорение при том же качестве составило 2,37 раза.

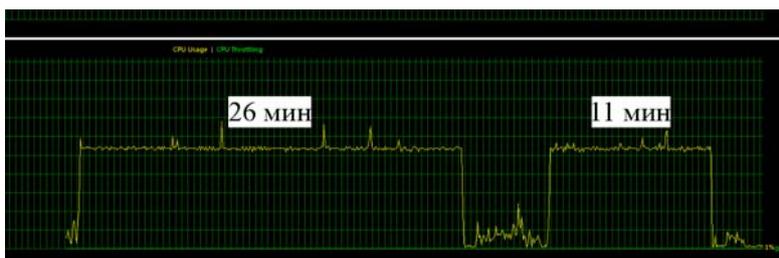


Рис. 6. Активность процессора при вычислении ПФр слева и при вычислении БПФр справа. Показано время соответствующих вычислений

Указанные виды симметрий не единственные и сейчас идет поиск использования других видов, что позволит разработать специальные методы обращения с большими массивами данных для получения новых алгоритмов расчета быстрого преобразования Френеля.

Проблема биений

Несколько проще, на первый взгляд, обстоят дела с численным формированием самой голограммы. Для записи цифрового эквивалента голограммы необходимо вычислить массив согласно выражению (6), а для восстановления – массив (3). Однако в этой простоте прячется подвох, связанный с дискретизацией исходных сигналов, представляемых матрицами комплексных чисел, объектного, опорного записывающего и опорного восстанавливающего оптических сигналов. При уходе от непрерывности к дискретизации появляются эффекты

появления ложных интерференционных полос. Это происходит в тех случаях, когда смещение пикселей в строках изображения становится сравнимым с шагом дискретизации. Такие ситуации появляются, когда шаг между дискретными отсчетами в поле голограммы становится сравним или больше периода интерференционных полос, образующих голограмму. На рис. 7 показаны интерференционные полосы, образованные при цифровом моделировании интерференции объектного и опорного пучков, когда объектный пучок $U_0(x_0, y_0)$ сформирован прозрачной призмой с высотой, определяющей фазовую задержку пучка. Далее эта задержка для удобства будет измеряться в длинах волн. Слева, при малой фазовой задержке, что соответствует высоте призмы в 100 длинам волн, они отчетливы, как в интерферометре. При переходе правее, что соответствует увеличению высоты призмы, они сначала просто наклоняются, затем в них появляется подобие расслаивания. И, наконец, при определенной высоте объекта, соответствующей 1100 периодам интерференционной картины, они пропадают совсем, а вместо них появляются «духи» с весьма значительным контрастом. При освещении такой голограммы восстанавливающим опорным пучком на этой структуре «духов» будет идти реальная дифракция света, приводящая к восстановлению голограммой предмета, отличного от исходного.

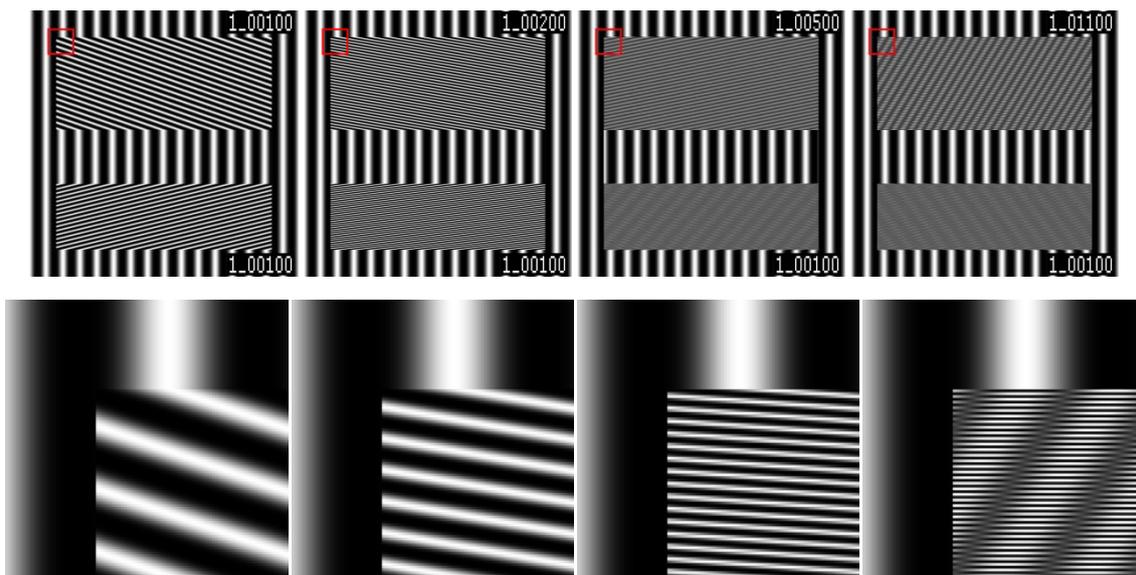


Рис. 7. Слева направо (вверху) видны рассчитанные по (7) матрицы $\tau(x_1, y_1)$ для голограммы призмы с увеличивающейся высотой. Нижний ряд – увеличенный участок этих голограмм, помеченный в верхнем ряду красным

Приведенные на рис. 7 изображения синтезированной голограммы $\tau(x_1, y_1)$ имеют размер $(n_1 \times m_1) = 1\,024 \times 1\,024$ точки и мы отчетливо видим появление ложных интерференционных полос. При увеличении размера $(n_1 \times m_1)$ и при более сложном объекте голографирования проконтролировать появление ложных полос очень сложно. Следовательно, для моделирования сравнительно не-

большой, изобразительной голограммы (рис. 8), даже если ее размер будет всего 90×127 мм, потребуется складывать и перемножать массивы чисел с двойной точностью размером $(n_1 \times m_1) \sim 10^{10}$. Если, при этом, объект будет иметь переменную по полю и значительную глубину, то будет трудно в таком большом массиве определить, какие полосы действительно возникают в результате сложения и интерференции двух волн, а какие есть результат указанной ошибки дискретизации матрицы изображения. Такие голограммы могут восстановить совсем не то, что мы хотели на них записать.

Критерием, по которому можно ориентироваться, является крутизна наклона поверхности записываемого на голограмму 3D объекта, или градиент.



Рис. 8. Представительская изобразительная голограмма

Из рис. 7 видно, при голографировании объекта с градиентом перепада высот в 5 раз превышающем градиент фазы наклонной опорной волны появляется и указанный эффект. А при градиенте в 10 раз превышающем градиент фазы наклонной опорной волны структуры голограммы может совсем разрушаться, одновременно создавая ложные интерференционные полосы. Таким образом, указанный эффект дискретизации ограничивает высоту по крайней мере для простых объектов (шар, призма). Для сложных художественных объектов высота должна быть еще меньше, точнее меньше должны быть все локальные перепады высот. Как уже было сказано, можно успешно моделировать цифровые голограммы объектов с градиентами меньше указанных, лучше много меньше.

Заключение

Предложенные в настоящей работе пути преодоления трудностей больших данных и интегральных преобразований в моделировании оптических волновых и голографических процессов апробированы на массивах, доступных для обработки на персональных компьютерах. Для интегральных преобразований предложено и опробовано использование симметрий, существующих в их ядрах. При работе с большими данными при создании цифрового образа голограммы предложено контролировать глубину голографируемого объекта так, чтобы не возникало биений, приводящих к появлению на голограмме полос, отсутствовавших в аналитическом выражении (7).

Дальнейшая работа по преодолению указанных трудностей может проводиться в развитии в аппаратных и программных методов.

Аппаратные методы включают:

- использование «суперкомпьютеров» для вычислений;
- использование нескольких компьютеров или ядер для параллельных вычислений (распараллеливание ресурсов и процессов).

Программные методы предусматривают:

- поиск симметрий в вычислительных процессах моделирования голограмм, позволяющих не считать одинаковые значения несколько раз, а фиксировать их в памяти и вызывать программно при необходимости (при этом не всегда необходимо делать расчет математически точным: для многих применений достаточно приближенных вычислений);
- уменьшение физического размера моделируемой голограммы, что приводит к увеличению количества дискретных отсчетов на единицу размера, что, в свою очередь, эквивалентно увеличению разрешения при цифровом моделировании или уменьшению шага дискретизации при вычислении голограммы;
 - вычисление голограммы по частям, а затем сборка их в общую картину;
 - вычисление голограммы по частям, но без последующей сборки частей, а с отправкой вычисленной части сразу на исполнительный элемент (дисплей, или графопостроитель).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денисюк Ю. Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // Доклады Академии наук СССР. – 1962. – Т. 144. – № 6. – С. 1275–1278.
2. Van Heerden P.J. A New Optical Method of Storing and Retrieving Information // Applied Optics. – 1963. – Vol. 2, № 4. – P. 387–392.
3. Hill B. Some Aspects of a Large Capacity Holographic Memory // Applied Optics. – 1972. – Vol. 11, № 1. – P. 182–196.
4. Гибин И. С., Мантуш Т. Н., Нестерихин Ю. Е., Панков Б. Н., Пен Е. Ф., Твердохлеб П. Е. Программируемое голограммное ЗУ с записью и считыванием информации // Автоматика. – 1975. – № 3. – С. 3–11.
5. Соскин С. И., Шойдин С. А., Левин В. И. Голографическое запоминающее устройство. Авторское свидетельство № 701350, 1979 г, зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР за № 2468584 от 01.04.1977 г.
6. Shoydin S. A. Holographic Memory Without Reference Beam // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2016. – Vol. 25, № 4. – P. 262–267. – ISSN 1060-992X.
7. Betin A. Yu., Bobrinev V. I., Donchenko S. S., Odinkov S. B., Evtikhiev N. N., Starikov R. S., Starikov S. N., Zlokazov E. Yu. Holographic memory optical system based on computer-generated Fourier holograms // Applied Optics. – 2013. – Vol. 52, № 33. – P. 8142–8145.
8. Дёмин В. В., Каменев Д. В. Апробация алгоритмов автоматического извлечения информации из цифровых голограмм частиц // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 10. – С. 95–101.
9. Рапопорт Б. И. Возможности передачи голографического изображения малокадровой телевизионной системой // Техника кино и телевидения. – 1971. – № 9. – С. 42.
10. Патент № US20060187297A1 US. Holographic 3-d television. МПК H04N 5/77.

11. Шойдин С. А. Заявка на изобретение № 2018124440/28(038712) от 03.07.2018.
12. Шойдин С. А. Информационные особенности голограмм: повышение информационной емкости и устранение избыточности // Тезисы докладов XVI международной конференции HOLOEXPO 2018. – Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Стрельна, СПб, 10–12 сентября 2019 (в печати).
13. Osseiran A., Voccardi F., Braun V., Kusume K., Marsch P., Maternia M., Queseth O., Schellmann M., Schotten H. Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project // IEEE Communications Magazine. – 2014. – Vol. 52, № 5. – P. 26–35.
14. Голографическое кино и телевидение / Энциклопедия по машиностроению. Оборудование, материалы, механика. – Т. XXL. – С. 115 / URL: <https://mash-xxl.info/info/565185>
15. Leith E. N., Upatnieks J. Reconstructed Wavefronts and Communication Theory // Journal of the Optical Society of America. – 1962. – Vol. 52. – P. 1123–1130.
16. Шойдин С. А. Методы оптической обработки информации : учеб. пособие. – Новосибирск : СГГА, 2008. – 124 с.
17. Гужов В. И., Несин Р. Б., Емельянов В. А. Представление преобразования Френеля в дискретной форме // Автоматика и программная инженерия. – 2016. – № 1 (15). – С. 91–96.
18. Гужов В. И. Математические методы цифровой голографии : учеб. пособие. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – 82 с.
19. Мерзляков Н. С., Попова Н. Р. Некоторые особенности использования дискретного преобразования Френеля при цифровом восстановлении голограмм // Автометрия. – 1987. – № 5. – С. 17–22.
20. Балтийский С. А., Гуров И. П., Де Никола С., Коппола Д., Ферраро П. Современные методы цифровой голографии // Проблемы когерентной и нелинейной оптики : сборник статей. – 2004. – С. 91–117.
21. Damien P. Kelly. Numerical calculation of the Fresnel transform // Journal of the Optical Society of America. – 2014. – Vol. 31, issue 4. – P. 755–764.
22. Mas D., Garcia J., Ferreira C., Bernardo L. M., Marinho F. Fast algorithms for free-space diffraction patterns calculation // Optics Communications. – 1999. – № 164. – P. 233–245.

© С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев, 2019