

УДК 535.8+004.942+535.41+535.3

ОЦЕНКА ДИФРАКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ОПТИЧЕСКОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ ФРЕНЕЛЯ

Н. Н. Евтихийев, С. Н. Стариков, П. А. Черёмхин, Е. А. Курбатова*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

Получены оценки дифракционной эффективности и качества изображений при оптическом восстановлении цифровых голограмм, выводимых на пространственно-временные модуляторы света с числом градаций яркости 2 и 256. Получены зависимости указанных параметров от отношения интенсивностей объектной и опорной волн при записи цифровых голограмм. Для моделирования оптического восстановления изображений использовались численно синтезированные цифровые голограммы Френеля. По результатам анализа определены отношения интенсивностей объектной и опорной волн, при которых получают наилучшие соотношения дифракционной эффективности и качества оптически восстанавливаемых изображений при использовании для вывода голограмм как амплитудных, так и фазовых пространственно-временных модуляторов света.

ВВЕДЕНИЕ

Качество восстановления изображений и дифракционная эффективность являются важнейшими характеристиками в классической (аналоговой) голографии [1]. Дифракционная эффективность голограммы определяется как отношение потока излучения в волне информативного порядка дифракции к потоку падающего на голограмму излучения. Понятие «качество восстановления изображений» достаточно широкое и может определяться такими параметрами, как, например, контраст и пространственное разрешение. Вопросы оценки дифракционной эффективности и качества восстановленных изображений широко исследовались и подробно описаны для различных регистрирующих сред (см., например, [2–4]).

В цифровой голографии [5] в качестве регистрирующей среды выступает матричный фоторегистратор камеры. Восстановление изображений с цифровых голограмм может быть осуществлено численно [5, 6] и оптически [6–21]. При численном восстановлении имеет значение только качество полученных изображений, а дифракционная эффективность не имеет прикладного значения. Однако в случае оптического восстановления она становится практически важной величиной. Наиболее распространённым методом оптического восстановления является вывод голограмм на пространственно-временные модуляторы света [6–21]. Оптическое восстановление изображений с голограмм используется как инструмент исследований и практических применений для удалённого отображения статических [6–10] и динамических [6, 9–14] плоских и объёмных сцен, в том числе зарегистрированных вне видимого диапазона длин волн [11], для проекционных систем [9], стереоскопического зрения [8] и др. Оно используется также и для оптической и оптоэлектронной обработки информации [15], метрологии [16–18], интерферометрии [19], микроскопии [20] и других областях техники. Помимо непосредственного вывода цифровых голограмм на пространственно-временные модуляторы света [6–20], используется и оптическое восстановление изображений с предварительно обработанных цифровых голограмм, т. е. реконструкция статических и динамических плоских и объёмных сцен [13, 21], микроскопия [21] и др.

* holo@pico.mephi.ru

Отметим основные работы по цифровой голографии, в которых были затронуты вопросы совместной оценки дифракционной эффективности и качества восстановленных изображений. В работе [22] были получены значения дифракционной эффективности синтезированных голограмм Фурье, в том числе бинаризованных, и проведено их сравнение с аналогичными величинами для аналоговых голограмм. Были установлены оценки отношения сигнал/шум восстановленных изображений. В работе [23] было рассчитано максимальное значение дифракционной эффективности цифровых голограмм Френеля, однако в некорректной форме: она определялась как отношение мощности дифрагированной волны информативного порядка к суммарной мощности всех дифрагированных волн.

Таким образом, в литературе не были получены и проанализированы зависимости дифракционной эффективности цифровых голограмм Френеля и Фурье, оптически восстановленных с помощью пространственно-временных модуляторов света, от отношения интенсивностей опорной и объектной волн при записи этих голограмм. Для случая амплитудных объектов отсутствуют зависимости качества восстановления от отношения интенсивностей опорной и объектной волн. Для случая фазовых объектов оценки приведены в [24]. Однако они не учитывают такие характеристики пространственно-временных модуляторов света, как максимальное количество градаций и их тип (амплитудный или фазовый).

В данной работе оценивались дифракционная эффективность и качество изображений при их оптическом восстановлении с цифровых голограмм Френеля. Для этого были получены зависимости этих параметров от условий записи цифровых голограмм — отношения интенсивностей объектного и опорного пучков, а также числа градаций и типа пространственно-временных модуляторов света. Данная задача решалась с помощью численного моделирования процесса регистрации цифровых голограмм и оптического восстановления изображений с них с помощью таких модуляторов. Оно состояло из следующих этапов.

1) Определение условий численных экспериментов по моделированию записи цифровых голограмм и оптическому восстановлению изображений с них: а) выбор характеристик исходных объектов (раздел 1.1); б) моделирование записи цифровых голограмм (раздел 1.2); в) моделирование вывода голограмм на амплитудный и фазовый пространственно-временной модулятор света (раздел 1.3); г) моделирование оптического восстановления изображений с использованием пространственно-временного модулятора света (раздел 1.4); д) критерии оценок качества и дифракционной эффективности голограмм при моделировании (раздел 1.5).

2) Оценки дифракционной эффективности и качества оптического восстановления изображений при помощи амплитудного пространственно-временного модулятора света с численно моделированных цифровых голограмм. Анализ полученных результатов (раздел 2).

3) То же самое, что в предыдущем пункте для фазового модулятора (раздел 3).

1. УСЛОВИЯ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ЗАПИСИ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ И ОПТИЧЕСКОМУ ВОССТАНОВЛЕНИЮ ИЗОБРАЖЕНИЙ С НИХ

Используемая схема численных экспериментов по моделированию записи цифровых голограмм и оптическому восстановлению изображений с них приведена на рис. 1. Она состоит из четырёх этапов: 1) создание модельного объекта; 2) моделирование записи голограммы, т. е. моделирование распространения волны от плоскости объекта до плоскости голограммы и синтез голограммы; 3) квантование голограммы и моделирование её вывода на пространственно-временной модулятор света; 4) моделирование оптического восстановления изображения, т. е. моделирование

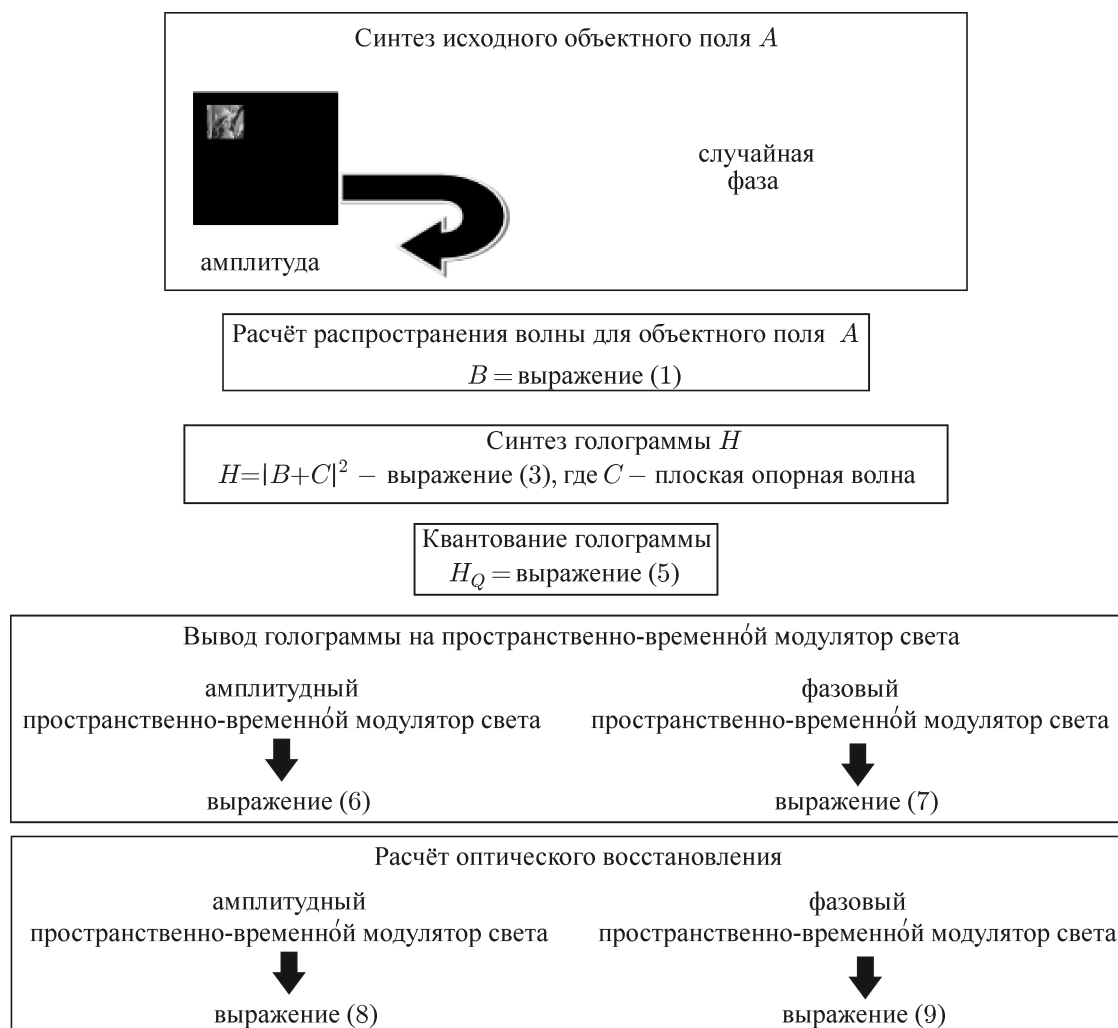


Рис. 1. Используемая схема моделирования записи цифровых голограмм и оптического восстановления изображений с них

распространения волны от плоскости пространственно-временного модулятора света до плоскости сфокусированного восстановленного изображения.

Опишем каждый из представленных этапов подробнее.

1.1. Характеристики исходных объектов и обоснование их выбора

В качестве исходных объектов использовались 20 амплитудно-фазовых плоских объектов. Примеры распределений интенсивностей окраски исходных объектов приведены на рис. 2: стандартное полутоновое изображение в оттенках серого цвета с равномерной гистограммой «Lenna» (рис. 2а) с размером 128×128 отсчётов и неравномерной гистограммой с размером 256×256 отсчётов (рис. 2б) и бинарное контурное изображение (рис. 2в) с размером 128×128 отсчётов. Амплитуда поля от объекта принималась равной квадратному корню из интенсивности. Фаза поля от исходных объектов по отсчётам была случайной величиной, равномерно распределённой от 0 до 2π , что позволяет считать эти объекты диффузно рассеивающими. Примером подобного моделируемого амплитудно-фазового плоского объекта в реальных экспериментах может

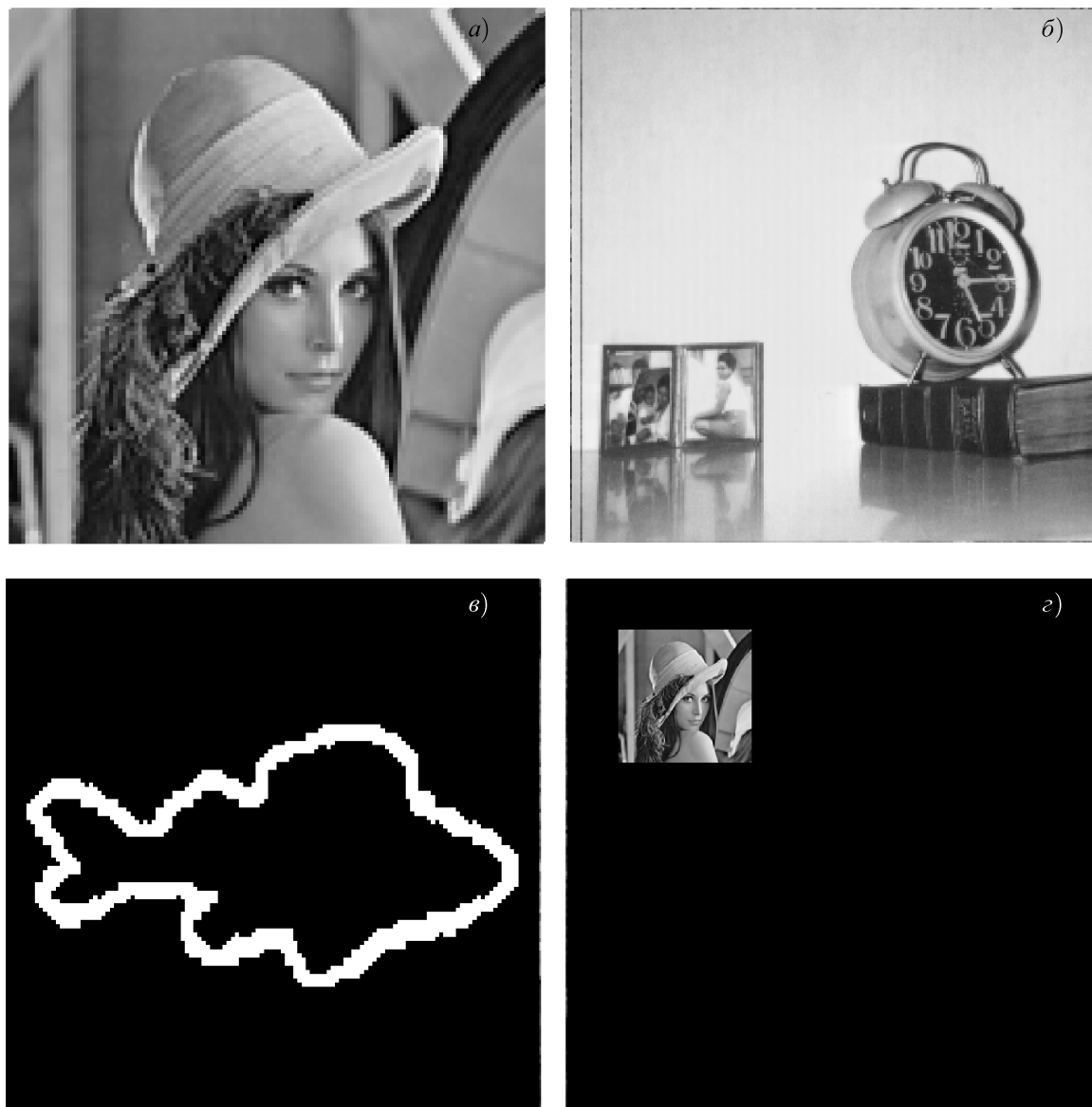


Рис. 2. Примеры распределений интенсивности окраски по объектам (а–в) и по объектному полю (г), используемые в численных экспериментах

являться изображение в оттенках серого, напечатанное на прозрачной плёнке, к которому вплотную помещено матовое стекло. Примеры численного и оптического восстановления изображений с цифровых голограмм подобных объектов, записанных в режиме освещения «на просвет», приведены, например, в [6].

Выбор плоских объектов определялся используемой схемой моделирования записи голограммы в режиме освещения объекта «на просвет». Однако представленный тип объектов может быть использован для записи голограмм и в режиме освещения объекта «на отражение». Выбор диффузного типа объектов для моделирования связан с их наибольшим распространением в цифровой голографии (см. например, [6, 11]). Размеры объектов $N_0 \times N_0$ варьировались от 16×16 до 512×512 пространственных отсчётов и, таким образом, охватывали широкий интервал размеров. Интенсивности окраски изображений объектов имели различный вид — полутоновые

с равномерной и неравномерной гистограммами и бинарные.

Для того, чтобы изображение объекта на восстановленном с цифровых голограмм поле не пересекалось с 0-м и –1-м порядками дифракции, при синтезе голограмм объект помещался в левую верхнюю часть тёмного поля. Размер тёмного поля, равный размеру синтезируемой голограммы, составлял от 256×256 до 2048×2048 пространственных отсчётов, т.е. был в $4 \div 8$ раз больше исходных объектов в каждом из поперечных направлений. Далее под «объектным полем» будет пониматься тёмное поле с помещённым в него объектом. Пример распределения интенсивности по объектному полю с размером 512×512 отсчётов представлен на рис. 2г.

При оптическом восстановлении изображений с цифровых голограмм практически для всех применений важно только получаемое распределение интенсивности окраски [6–21]. Поэтому считалось, что интересующая информация заключена только в пространственном распределении интенсивности окраски этих объектов и качество восстановления их изображений оценивалось по распределению этой интенсивности.

1.2. Моделирование записи цифровых голограмм

Обозначим объектное поле как $A(x, y, 0)$, где x, y — координаты в плоскости объекта. Таким образом, $A(x, y, 0)$ будет являться комплексной амплитудой объектной волны в плоскости $z = 0$. Далее методом прямого расчёта дифракции Френеля [5] находилось распределение комплексных амплитуд объектной волны $B(u, v, z)$ в плоскости регистрации голограммы фотосенсором цифровой камеры, расположенным на расстоянии z от плоскости объекта:

$$B(u, v, z) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{i\pi(u^2 + v^2)}{\lambda z}\right] \text{FFT}\left\{A(x, y, 0) \exp\left[\frac{i\pi(x^2 + y^2)}{\lambda z}\right]\right\}, \quad (1)$$

где u, v, z — координаты в плоскости фотосенсора, λ — длина волны излучения, k — волновое число, FFT — быстрое преобразование Фурье. Как обычно предполагается в модельных экспериментах по записи цифровых голограмм, опорная волна является плоской и распространяющейся перпендикулярно к плоскости фотосенсора. В плоскости фотосенсора фаза опорной волны принималась равной нулю, а её амплитуда — константе C . Значение последней определялось средней интенсивностью объектной волны в плоскости фотосенсора и величиной p — отношением средних по пикселям интенсивностей опорной и объектной волн. В ходе численных экспериментов величина p менялась в пределах от 0,1 до 100. Таким образом, амплитуда опорной волны задавалась формулой

$$C = \sqrt{p \langle |B(u, v, z)|^2 \rangle}, \quad (2)$$

где угловые скобки означают среднее значение по отсчётам синтезируемой голограммы.

Суммарное распределение интенсивности при данном значении z рассматривалось как регистрируемая камерой голограмма $H(u, v)$:

$$H(u, v) = |B(u, v, z) + C|^2. \quad (3)$$

Во всех численных экспериментах длина волны электромагнитного поля принималась равной $\lambda = 532$ нм, что соответствует излучению Nd:YAG-лазера с удвоением частоты. Размер пикселей фотосенсора камеры (т.е. отсчётов голограмм) Δh составлял 9 мкм, что соответствует, например, размеру пикселя научной измерительной цифровой камеры MegaPlus II ES11000. Число отсчётов голограмм равнялось числу отсчётов объектных полей, т.е. размер $N \times N$ варьировался от 256×256 до 2048×2048 отсчётов.

При использовании метода прямого расчёта дифракции Френеля [5] для восстановления изображений размер отсчёта численно восстановленного поля Δx по каждому из поперечных направлений определяется формулой

$$\Delta x = \frac{\lambda z}{N \Delta h} = \frac{z}{z_0} \Delta h, \quad (4)$$

где $z_0 = N (\Delta h)^2 / \lambda$, а z — расстояние от объекта до голограммы. Величина Δx есть пространственное разрешение восстановленного изображения объекта. При $z = z_0$ размеры отсчётов голограммы и восстановленного поля будут одинаковы и, следовательно, 0-й порядок дифракции будет занимать всю площадь восстановленного поля. С увеличением z линейный размер 0-го порядка дифракции на восстановленном поле, выраженный в количестве отсчётов, уменьшается пропорционально z/z_0 . При этом реальный физический размер порядка остаётся неизменным. Чтобы действительное изображение объекта на восстановленном поле (т.е. –1-й порядок дифракции) не пересекалось с 0-м и +1-м порядками дифракции, в ходе численных экспериментов объект помещался, как уже указывалось, на тёмное поле большего размера; расстояние z от объекта до голограммы (т.е. фотосенсора) варьировалось в пределах от $4z_0$ до $100z_0$, т.е. составляло от 0,04 м (256×256 отсчётов) до 31,2 м (2048×2048 отсчётов).

Физический смысл расстояния z_0 заключается в следующем. Пусть объектом является точечный источник, расположенный на перпендикуляре к плоскости регистрируемой голограммы, проведённом из её центра. Тогда z_0 есть минимальное расстояние, при котором ширина колец, образованных любыми соседними зонами Френеля, уместающимися в пределах голограммы, будет не меньше размера отсчёта голограммы, т.е. они будут разрешены.

В численных экспериментах, проводимых при различных расстояниях z , геометрический размер объектов и их изображений на восстановленном поле менялся пропорционально z/z_0 (см. выражение (4)), что обеспечивало постоянство их угловых размеров. Соответственно, выраженные в числах отсчётов размеры объектов и их изображений оставались постоянными, т.е. информационное содержание объектов не менялось. Так, площадь объекта $N_0 \Delta x \times N_0 \Delta x$ с числом отсчётов 128×128 составляла от $4,6 \times 4,6$ мм (расстояние $4z_0$) до 115×115 мм ($100z_0$).

1.3. Параметры используемых пространственно-временных модуляторов света и моделирование отображения цифровых голограмм на них

После синтеза цифровых голограмм проводилось моделирование оптического восстановления изображений с этих голограмм, выведенных на пространственно-временные модуляторы света. Рассматривались два основных типа таких модуляторов: фазовый и амплитудный [25–27]. Числа градаций интенсивности в пространственно-временном модуляторе света были выбраны равными 2 (бинарный модулятор) и 256 (модулятор с 256 градациями). Такие числа градаций являются наиболее распространёнными в современных моделях данных устройств [25–27]. Так, фазовый жидкокристаллический пространственно-временной модулятор света HoloEye PLUTO VIS [26] имеет 256 адресуемых градаций фазы. Амплитудный пространственно-временной модулятор света с микроэлектромеханическим чипом 0.3 WVGA (компания Texas Instruments [27]) имеет возможность адресации 2-х градаций сигнала. Для сравнения рассматривается третий случай количества градаций пространственно-временного модулятора света, являющийся идеализированным, т.е. соответствующим практически неограниченному числу градаций. В этом случае число градаций пространственно-временного модулятора света ограничивалось лишь точностью вычислений используемого компьютера и составляло приблизительно 10^{16} .

В данной работе рассматривается моделирование прямого отображения голограмм на пространственно-временных модуляторах света. При этом число градаций яркости модельной цифро-

вой голограммы конвертировалось в число градаций такого модулятора. Поэтому на модельный бинарный пространственно-временной модулятор света будет выводиться бинарная голограмма. А на модельный пространственно-временной модулятор света с 256 градациями интенсивности будут выводиться голограммы с 256 градациями.

Рассмотрим моделирование вывода голограммы на амплитудный и фазовый пространственно-временные модуляторы света. Этапы моделирования можно представить следующим образом:

1) Число градаций цифровой голограммы либо не уменьшается (идеализированный пространственно-временной модулятор света), либо уменьшается до 256 или 2. Число градаций голограммы уменьшалось равномерно по уровням сигнала. Массив с отсчётами квантованной голограммы определялся следующим образом:

$$H_Q(u, v) = \begin{cases} Q - 1, & H(u, v) = \max[H(u, v)]; \\ \text{fix}\left\{\frac{H(u, v)}{\max[H(u, v)]} Q\right\}, & H(u, v) \neq \max[H(u, v)]. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь $\max$ — максимальный элемент массива с отсчётами голограммы, Q — число градаций голограммы (2 или 256), fix — функция отбрасывания дробной части. Минимальный элемент квантованной голограммы равен 0, а максимальный — 1 (для бинарной голограммы) или 255 (для голограммы с 256 градациями).

2) Моделируется освещение голограммы, выведенной на пространственно-временной модулятор света, плоской волной и определяются амплитуда и фаза волны после этого модулятора. Рассмотрим амплитудный тип пространственно-временного модулятора света. В случае падения на него плоской волны с единичной амплитудой оцифрованная амплитуда будет равняться $H_Q(u, v)$. Фаза при этом не будет меняться. В результате можно считать, что волна после пространственно-временного модулятора света будет иметь следующие характеристики:

$$H_Q^{\text{AMP}}(u, v) = H_Q(u, v). \quad (6)$$

Теперь рассмотрим процесс моделирования вывода голограммы на фазовый пространственно-временной модулятор света. Фазовый сдвиг, вносимый отсчётом такого модулятора, устанавливался прямо пропорциональной значению отсчёта модельной цифровой голограммы. Предобработка амплитудных цифровых голограмм при выводе на фазовый пространственно-временной модулятор света не проводилась, поскольку данные голограммы предназначались для оптического восстановления в режиме реального времени. Пусть максимальный возможный фазовый сдвиг при использовании пространственно-временного модулятора света равен 2π , что является типичной величиной для фазовых пространственно-временных модуляторов света [25, 26]. В случае прохождения плоской волны её амплитуда меняться не будет, а фаза изменится. В этом случае волна после пространственно-временного модулятора света будет иметь следующие характеристики:

$$H_Q^{\text{PH}}(u, v) = \exp\{i[H_Q(u, v) 2\pi (Q - 1)/Q]\}. \quad (7)$$

Поскольку фазы 0 и 2π дают одинаковый сдвиг, то в выражение (7) введено отношение $(Q - 1)/Q$.

Данная модель вывода голограммы на пространственно-временной модулятор света не зависит от принципа его работы и пригодна для модуляторов, работающих в режиме как «на отражение», так и «на просвет».

1.4. Моделирование оптического восстановления изображений с цифровых голограмм, выведенных на пространственно-временной модулятор света

Распространение волны после пространственно-временного модулятора света рассчитывалось аналогично распространению объектной волны (см. выражение (1)) с использованием метода прямого расчёта дифракции Френеля. В качестве исходных полей для этого случая будут использоваться $H_Q^{\text{AMP}}(u, v)$ при моделировании амплитудного пространственно-временного модулятора света и $H_Q^{\text{PH}}(u, v)$ при моделировании фазового пространственно-временного модулятора света. Плоскость сфокусированного восстановленного изображения объекта будет расположена на расстоянии z от пространственно-временного модулятора света (т. е. на том же расстоянии, что и при синтезе голограммы (см. выражение (1)), при использовании той же длины волны излучения λ):

$$D^{\text{AMP}}(x', y', 2z') = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{i\pi(x'^2 + y'^2)}{\lambda z}\right] \text{FFT}\left\{H_Q^{\text{AMP}}(u, v) \exp\left[\frac{i\pi(u^2 + v^2)}{\lambda z}\right]\right\}, \quad (8)$$

$$D^{\text{PH}}(x', y', 2z) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{i\pi(x'^2 + y'^2)}{\lambda z}\right] \text{FFT}\left\{H_Q^{\text{PH}}(u, v) \exp\left[\frac{i\pi(u^2 + v^2)}{\lambda z}\right]\right\}, \quad (9)$$

где $x', y', 2z$ — координаты в плоскости сфокусированного восстановленного изображения, $D^{\text{AMP}}(x', y', 2z)$ и $D^{\text{PH}}(x', y', 2z)$ — комплексные амплитуды восстановленных волн. В численных экспериментах длина волны излучения принималась равной $\lambda = 532$ нм. Размер пикселей пространственно-временного модулятора света составлял 8 мкм, что соответствует, например, размеру пикселя фазового жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света HoloEye PLUTO VIS [26]. Число отсчётов восстановленных изображений равнялось числу отсчётов выводимых голограмм, т. е. от 256×256 до 2048×2048 . Примеры численного моделирования оптического восстановления изображения (при помощи амплитудного и фазового пространственно-временных модуляторов света) с численно моделированными цифровыми голограмм приведены на рис. 3. Для моделирования цифровой голограммы использовался полутонный объект, представленный на рис. 2а.

1.5. Используемые критерии оценки качества восстановленных изображений и дифракционной эффективности

Как уже было сказано, качество восстановления изображений объектов с голограмм оценивалось по распределению интенсивности их окраски. Для оценки качества численного восстановления изображений объекта использовалось нормированное среднеквадратическое отклонение σ [28] восстановленного голограммой изображения объекта от оригинала объекта:

$$\sigma = \sqrt{1 - \frac{\left\{\sum [I_{A-0}(x, y, 0) I_{D-0}(x', y', 2z)]\right\}^2}{\sum [I_{A-0}(x, y, 0)]^2 \sum [I_{D-0}(x', y', 2z)]^2}}, \quad (10)$$

где $I_{A-0}(x, y, 0)$ — массив с интенсивностями окраски исходного изображения объекта (не объектного поля); $I_{D-0}(x', y', 2z)$ — массив с интенсивностями окраски восстановленного изображения объекта (полученный из комплексных амплитуд $D^{\text{AMP}}(x', y', 2z)$ или $D^{\text{PH}}(x', y', 2z)$, $\sum$ — сумма элементов массива. Величина σ количественно оценивает степень визуального сходства с оригиналом, в том числе в передаче полутонных объектов. В ходе численных экспериментов было установлено, что при σ , меньшем 0,03, восстановленное изображение объекта визуально практически неотличимо от исходного.



Рис. 3. Численно восстановленные изображения объекта при моделировании амплитудного (*а, б*) и фазового (*в, з*) пространственно-временных модуляторов света. Панели *а* и *в* соответствуют модулятору (голограмме) с 256 градациями оттенков, *б* и *з* — с 2 градациями

С использованием выражения (10) для восстановленных изображений объектов, представленных на рис. 3, получены следующие значения σ : 0,0024 (панель *а*), 0,33 (*б*), 0,22 (*в*) и 0,34 (*з*). Как видно, с точки зрения оценки величины σ (так же, как и по визуальной оценке) восстановленное изображение с амплитудного пространственно-временного модулятора света с 256 градациями имеет существенно лучшее качество, чем с фазового. Это связано с тем, что цифровые голограммы, регистрируемые цифровыми фотоприёмниками, являются по сути амплитудными. Амплитудные цифровые голограммы при выводе на фазовый пространственно-временной модулятор света предварительно не обрабатывались, поскольку, как указывалось в разделе 1.4, данные голограммы предназначались для оптического восстановления в режиме реального времени. Алгоритмы таких преобразований приведены, например, в [29, 30] и характеризуются высокой

ёмкостью вычислительных ресурсов.

Уменьшение числа градаций голограммы приводит к потере части информации о регистрируемой объектной волне. Поэтому качество восстановления изображения при использовании пространственно-временного модулятора света с 256 градациями должно быть выше, чем для бинарного пространственно-временного модулятора света. Это и наблюдается при сравнении рис. 3а и б, а также рис. 3в и г.

По результатам моделирования проводился также расчёт дифракционной эффективности модельных цифровых голограмм при их оптическом восстановлении. Дифракционная эффективность может быть найдена как произведение двух величин: DE_H — доли мощности излучения, прошедшей через голограмму, и DE_O — отношения мощности волны, формирующей восстановленное изображение объекта, к суммарной мощности всех дифрагированных волн:

$$DE = DE_H DE_O = \left\{ \frac{\langle H(u, v, z) \rangle}{\max\{H(u, v, z)\}} \right\}^2 \frac{\sum I_{D=0}(x', y', 2z)}{\sum I_D(x', y', 2z)}, \quad (11)$$

где $I_D(x', y', 2z)$ — массив с интенсивностями восстановленного поля, т. е. соответствующего всем дифракционным порядкам.

Следует отметить, что теоретические максимальные значения дифракционной эффективности составляют 0,101 для амплитудного пространственно-временного модулятора света и 0,404 для фазового пространственно-временного модулятора света. Эти предельные значения достигаются при выводе голограммы в виде бинарной решётки со скважностью, равной единице [1]. В случае голограммы в виде синусоидальной решётки максимальные значения дифракционной эффективности уменьшаются до 0,0625 и 0,339 для амплитудного и фазового пространственно-временных модуляторов света соответственно [1]. В связи с этим бинаризация голограмм при выводе на пространственно-временной модулятор света может рассматриваться как способ увеличения их дифракционной эффективности. Однако, как уже указывалось, это может привести к значительной потере качества восстановленного изображения.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ЧИСЛЕННО МОДЕЛИРОВАННЫХ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ. СЛУЧАЙ АМПЛИТУДНОГО ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА

С использованием объектов различного размера и типа (см. раздел 1.1) проведено моделирование оптического восстановления изображений при помощи амплитудного пространственно-временного модулятора света с численно моделированных цифровых голограмм. При этом при синтезе голограмм менялось значение p (см. выражение (2)), т. е. отношение интенсивностей опорной и объектной волн. Далее, согласно выражению (11), для каждого случая восстановления изображения находилась дифракционная эффективность. На рис. 4 приведены полученные зависимости дифракционной эффективности голограмм от значения p для трёх случаев: а) бинарный пространственно-временной модулятор света, б) пространственно-временной модулятор света с 256 градациями яркости, в) пространственно-временной модулятор света без уменьшения числа градаций (т. е. идеализированный модулятор). Зависимости отвечают полутонному объекту «Леппа», распределение интенсивности окраски для которого представлено на рис. 2а. Расстояние от объекта до голограммы принималось равным $6z_0$.

Как было указано в разделе 1.5, дифракционная эффективность у бинарной голограммы выше, чем у многоградационных. Это подтверждается представленным случаем (как видно из

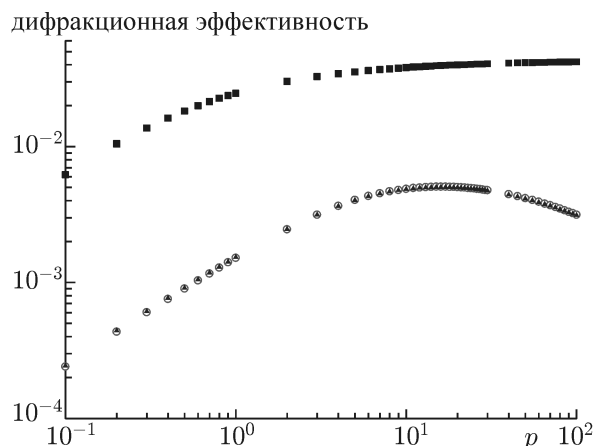


Рис. 4. Зависимость дифракционной эффективности амплитудных цифровых голограмм от отношения интенсивностей опорной и объектной волн p для случая восстановления с помощью амплитудного пространственно-временного модулятора света: ■ — бинарный модулятор, ○ — модулятор с 256 градациями оттенков, ▲ — идеализированный модулятор

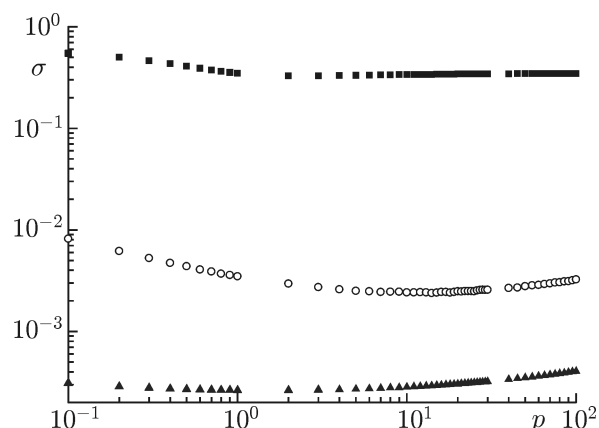


Рис. 5. Зависимость нормированного среднеквадратического отклонения σ восстановленного с амплитудных цифровых голограмм изображения по отношению к оригиналу от отношения интенсивностей опорной и объектной волн p для случая восстановления с помощью амплитудного пространственно-временного модулятора света: ■ — бинарный модулятор, ○ — модулятор с 256 градациями оттенков, ▲ — идеализированный модулятор

рис. 4, в $7 \div 25$ раз). Дифракционные эффективности для случаев идеализированного амплитудного пространственно-временного модулятора света и модулятора с 256 градациями практически не отличаются. Для последнего максимальное значение дифракционной эффективности достигается при отношении интенсивностей опорной и объектной волн $p = 16$. Данная величина p приблизительно соответствует используемой в аналоговой голографии для получения максимальной дифракционной эффективности [1].

Помимо расчёта дифракционной эффективности, вычислялось также значение σ восстановленного изображения относительно оригинала согласно выражению (10). На рис. 5 приведены полученные зависимости величины σ от отношения интенсивностей опорной и объектной волн. Из них следует, что при использовании бинарного амплитудного пространственно-временного модулятора света качество восстановленного изображения сильно (в $70 \div 140$ раз по величине σ) уступает остальным двум случаям, т.е. использованию пространственно-временного модулятора света с 256 градациями и идеализированного модулятора. Это согласуется с приведёнными в разделе 1.5 замечаниями. Восстановленные изображения при использовании пространственно-временного модулятора света с 256 градациями и идеализированного модулятора практически идентичны с визуальной точки зрения, т.к. в этих случаях σ значительно меньше, чем 0,03. Как отмечалось (см. раздел 1.5), при $\sigma < 0,03$ восстановленное изображение объекта практически неотлично от исходного. Из представленного на рис. 5 графика следует, что при $0,5 \leq p \leq 20$ величина σ меняется слабо и качество восстановления изображения с визуальной точки зрения для всех трёх случаев амплитудного пространственно-временного модулятора света является наилучшим.

Таким образом, при записи цифровых голограмм, предназначенных для оптического восстановления при помощи амплитудных пространственно-временных модуляторов света, для выбора оптимального отношения интенсивностей опорной и объектной волн (т.е. величины p) следует

Таблица 1. Максимальная дифракционная эффективность и минимальное σ восстановленного изображения по отношению к оригиналу и соответствующие им отношения интенсивностей опорной и объектной волн при восстановлении с помощью амплитудных бинарного пространственно-временного модулятора света и модулятора с 256 градациями

Характеристика	Случай восстановления объекта, представленного на рис. 2а		Обобщение результатов по восстановлению 20 объектов	
	2 градации	256 градаций	2 градации	256 градаций
Максимальная дифракционная эффективность	0,04	0,005	0,04	0,005÷0,007
Отношение интенсивностей опорной и объектной волн при максимуме дифракционной эффективности	≥ 20	16	≥ 20	16÷20
Минимальное σ	0,33	0,0024	0,11÷0,39	0,0002÷0,015
Отношение интенсивностей опорной и объектной волн при минимальном σ	2	14	2÷12	10÷16

ориентироваться в первую очередь на достижение максимальной дифракционной эффективности. Это связано с тем, что последняя зависит от p значительно сильнее, чем величина σ .

На рис. 3а, б представлены наилучшие по соотношению «минимальное σ —максимальная дифракционная эффективность» восстановленные изображения объекта с бинарного амплитудного пространственно-временного модулятора света (при $p = 20$) и амплитудного модулятора с 256 градациями (при $p = 16$).

По результатам серии численных расчётов с использованием 20 объектов различных типов и размеров получены зависимости дифракционной эффективности и σ от отношения интенсивностей опорной и объектной волн. Результаты аналогичны показанным на рис. 4 и 5. В табл. 1 приведены полученные в численных экспериментах максимальная дифракционная эффективность, минимальное σ и соответствующие им отношения интенсивностей опорной и объектной волн при записи цифровых голограмм.

Полученные максимальные значения дифракционной эффективности меньше предельных теоретических (см. раздел 1.5) в 2,5 раза для бинарного пространственно-временного модулятора света и в 14÷20 раз для модулятора с 256 градациями яркости. Это связано с тем, что при моделировании использовались диффузные объекты, приближённые к реальным. На практике следует ожидать ещё меньшей дифракционной эффективности из-за переотражений от оптических элементов при записи цифровых голограмм, наличия шумов регистрирующих фотосенсоров [31] и неточностей отображения сигнала на пространственно-временном модуляторе света (например, флуктуаций модуляции фазы в жидкокристаллических модуляторах [32, 33]). Качество восстановления всех изображений, как и для полутонного объекта «Леппа», практически не меняется при $0,5 \leq p \leq 20$.

Таким образом, как следует из полученных результатов (см. рис. 4 и 5 и табл. 1) при записи цифровых голограмм, предназначенных для оптического восстановления при помощи амплитудных пространственно-временных модуляторов света, для получения минимального σ и максимальной дифракционной эффективности следует ориентироваться на отношение интенсивностей опорной и объектной волн p , равное приблизительно 15. Полученная величина p примерно соответствует используемой в случае аналоговых голограмм.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ЧИСЛЕННО МОДЕЛИРОВАННЫХ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ. СЛУЧАЙ ФАЗОВОГО ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА

Моделирование оптического восстановления изображений с использованием фазового пространственно-временного модулятора света с численно моделированных цифровых голограмм проводилось для тех же объектов, что и в разделе 2. Как и ранее, при синтезе голограмм менялось отношение интенсивностей опорной и объектной волн p (см. выражение (2)). Далее, согласно выражению (11), в каждом случае находилась дифракционная эффективность и, согласно выражению (10), величина σ оптически восстановленного изображения по отношению к оригиналу. Исследовались три случая фазовых пространственно-временных модуляторов света: бинарный, с 256 градациями и идеализированный. На рис. 6 и 7 приведены полученные зависимости дифракционной эффективности голограмм и σ от отношения интенсивностей опорной и объектной волн для объекта «Lenna», представленного на рис. 2а. Расстояние от объекта до голограммы равнялось $6z_0$.

Как видно из приведённых зависимостей, при использовании фазового пространственно-временного модулятора света максимальная дифракционная эффективность достигается для бинарного модулятора. Это согласуется с замечаниями в разделе 1.5. Дифракционная эффективность для бинарного пространственно-временного модулятора света в $2\div 4$ раза больше, чем для модулятора с 256 градациями и идеализированного модулятора. Для бинарного пространственно-временного модулятора света при отношении интенсивностей опорной и объектной волн $p \geq 10$ дифракционная эффективность слабо меняется и близка к максимальной. Для модулятора с 256 градациями максимальная дифракционная эффективность достигается при отношении интенсивностей опорной и объектной волн $p = 12$.

Как и при использовании амплитудных пространственно-временных модуляторов света, качество изображения, восстановленного с бинарного фазового пространственно-временного модулятора света, уступает качеству изображения, восстановленного с фазового пространственно-временного модулятора света с 256 градациями оттенков (см. рис. 7). Как уже указывалось, это связано с тем, что уменьшение числа градаций голограммы приводит к потере части информации о регистрируемой объектной волне. Полученные зависимости для фазового пространственно-временного модулятора света с 256 градациями оттенков и идеализированного фазового модулятора практически идентичны. Этот результат также аналогичен случаю восстановления изображений с использованием амплитудного пространственно-временного модулятора света. Для бинарного фазового пространственно-временного модулятора света при $p > 1$ величина σ меняется слабо и близка к минимальному значению. Для фазового модулятора с 256 градациями оттенков качество восстановления наилучшее при p , близких к 100. В результате для фазового пространственно-временного модулятора света с 256 градациями оттенков качество восстановления изображений может быть улучшено в 3 раза при росте p от $p \leq 1$ до $p \approx 100$.

Как и предполагалось, с использованием фазового пространственно-временного модулятора света максимальное достигнутое значение дифракционной эффективности оказалось значительно (в 8 раз) больше, чем в случае амплитудного модулятора. Однако в случае фазового модулятора качество восстановления изображений хуже (величина σ увеличивается в 50 раз), чем при использовании амплитудного модулятора. Это связано с тем, что, как указывалось в разделе 1.4, нами моделировалось прямое отображение регистрируемых амплитудных цифровых голограмм на фазовом пространственно-временном модуляторе света, т. е. величина фазового сдвига, вносимого отсчётом модулятора, устанавливалась прямо пропорциональной значению отсчёта плотности

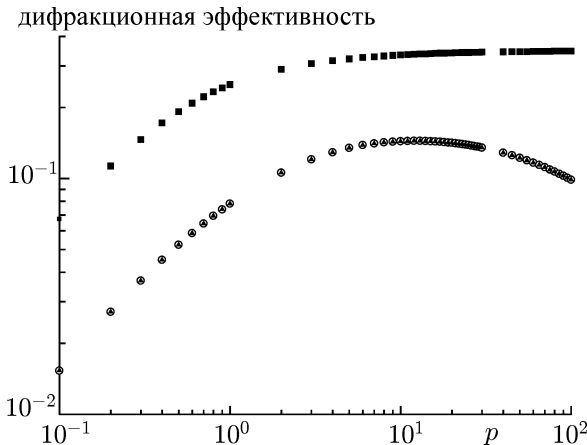


Рис. 6. Зависимость дифракционной эффективности амплитудных цифровых голограмм от отношения интенсивностей опорной и объектной волн p для случая восстановления с помощью фазового пространственно-временного модулятора света: ■ — бинарный модулятор, ○ — модулятор с 256 градациями оттенков, ▲ — идеализированный модулятор

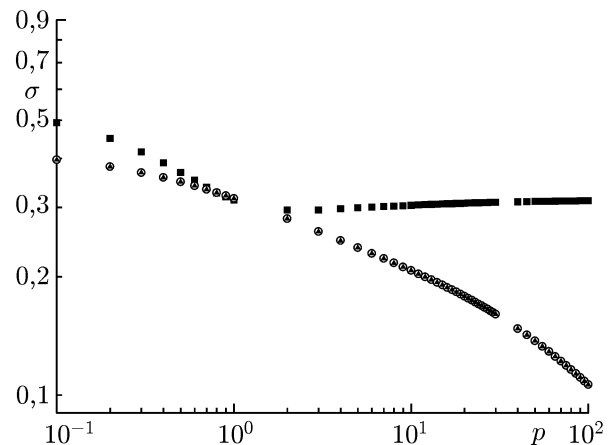


Рис. 7. Зависимость нормированного среднеквадратического отклонения σ восстановленного с амплитудных цифровых голограмм изображения по отношению к оригиналу от отношения интенсивностей опорной и объектной волн p для случая восстановления с помощью фазового пространственно-временного модулятора света: ■ — бинарный модулятор, ○ — модулятор с 256 градациями оттенков, ▲ — идеализированный модулятор

потока модельной цифровой голограммы.

На рис. 3в, г представлены результаты восстановления изображения при отношении интенсивностей опорной и объектной волн $p = 12$.

По результатам серии численных экспериментов с использованием 20 объектов различных типов и размеров получены зависимости дифракционной эффективности и σ от отношения интенсивностей опорной и объектной волн. Результаты аналогичны полученным для полутонного объекта «Lenna» (см. рис. 6 и 7), восстановленные изображения которого представлены на рис. 3в, г. В табл. 2 приведены полученные в ходе численных экспериментов максимальная дифракционная эффективность, минимальное σ и соответствующие им отношения интенсивностей опорной и объектной волн при записи цифровых голограмм.

Как видно, результаты для полутонного объекта «Lenna», представленного на рис. 2а, аналогичны полученным на выборке изображений. Достигнутые максимальные значения дифракционной эффективности меньше предельных теоретических (0,404, см. раздел 1.5) в 1,2 раза для бинарного фазового пространственно-временного модулятора света и в 2,5÷3 раза для модулятора с 256 градациями оттенков. Это объясняется тем, что, как и в случае амплитудного модулятора, при моделировании использовались диффузные объекты, приближенные к реальным. На практике, как и для амплитудного пространственно-временного модулятора света, следует ожидать ещё меньшей дифракционной эффективности из-за переотражений от оптических элементов при записи цифровых голограмм, наличия шумов регистрирующих фотосенсоров и неточностей отображения сигнала на пространственно-временном модуляторе света.

Отношение максимальных дифракционных эффективностей для бинарного фазового пространственно-временного света и фазового модулятора с 256 градациями оттенков составляет 3, в то время как для амплитудных модуляторов оно равно 6÷8 (см. раздел 2). Это связано со следующим обстоятельством. В случае фазового пространственно-временного модулятора све-

Таблица 2. Максимальная дифракционная эффективность и минимальное σ восстановленного изображения по отношению к оригиналу и соответствующие им отношения интенсивностей опорной и объектной волн при восстановлении с помощью фазовых бинарного пространственно-временного модулятора света и модулятора с 256 градациями оттенков

Характеристика	Случай восстановления объекта, представленного на рис. 2а		Обобщение результатов по восстановлению 20 объектов	
	2 градации	256 градаций	2 градации	256 градаций
Максимальная дифракционная эффективность	0,34	0,14	$0,34 \div 0,36$	$0,13 \div 0,17$
Отношение интенсивностей опорной и объектной волн при максимуме дифракционной эффективности	≥ 10	12	$\geq (10 \div 20)$	$10 \div 14$
Минимальное σ	0,33	0,12	$0,11 \div 0,39$	$0,04 \div 0,15$
Отношение интенсивностей опорной и объектной волн при минимальном σ	2	≥ 60	$2 \div 3$	$\geq (40 \div 70)$

та падающая на модулятор волна меняет только фазу, а её амплитуда остаётся неизменной. Поэтому для фазового модулятора множитель DE_H , входящий в выражение (11), равен единице и дифракционная эффективность определяется только величиной DE_O . В то же время для бинарного амплитудного пространственно-временного модулятора света среднее значение интенсивности выводимой голограммы равно 0,5 от максимального значения. В случае амплитудного модулятора с 256 градациями оттенков это среднее значение составляет около 0,15 от максимального по голограмме значения. В результате множитель DE_H для амплитудного пространственно-временного модулятора света с 256 градациями оказывается на порядок меньше, чем в случае бинарного амплитудного модулятора.

Полученные результаты показывают, что использование фазового пространственно-временного модулятора света с 256 градациями оттенков вместо бинарного фазового модулятора позволяет улучшить качество оптического восстановления в 3 раза по величине σ за счёт увеличения числа градаций голограммы.

Таким образом, как следует из полученных результатов (см. рис. 6 и 7 и табл. 2), при записи цифровых голограмм для получения минимального σ и максимальной дифракционной эффективности (при оптическом восстановлении с помощью фазового пространственно-временного модулятора света) следует ориентироваться на следующие отношения интенсивностей опорной и объектной волн p — более 10 для бинарного модулятора и более 40 для модулятора с 256 градациями.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье с помощью численного моделирования исследовалось влияние условий записи цифровых голограмм Френеля — отношения плотностей потока опорной и объектной волн и характеристик пространственно-временных модуляторов света — на качество оптического восстановления изображений с цифровых голограмм Френеля, выводимых на пространственно-временные модуляторы света, и дифракционную эффективность выводимых голограмм.

При моделировании рассматривались амплитудные и фазовые пространственно-временные модуляторы света с числом градаций оттенков 2 и 256, а также идеализированный модулятор без ограничения числа градаций. При моделировании регистрации цифровых голограмм отношение интенсивностей опорной и объектной волн варьировалось в диапазоне от 0,1 до 100. Регистрируемые на голограмму диффузные объекты отличались по линейным размерам максимально в 32 раза, расстояние между объектом и голограммой изменялось в 25 раз, число отсчётов голограмм по линейным координатам отличалось максимально в 8 раз.

По результатам численных экспериментов установлено, что для случая оптического восстановления с помощью амплитудного пространственно-временного модулятора света при записи цифровых голограмм следует ориентироваться на отношение интенсивностей опорной и объектной волн, равное приблизительно 15. В этом случае для амплитудного пространственно-временного модулятора света с 256 градациями оттенков дифракционная эффективность достигает 0,006, а σ ограничивается величиной 0,01.

При записи цифровых голограмм, предназначенных для оптического восстановления с помощью фазового пространственно-временного модулятора света с 256 градациями оттенков, следует ориентироваться на отношение интенсивностей опорной и объектной волн более 40. В этом случае дифракционная эффективность составляет 0,14, а σ — менее 0,2. Качество восстановления сильно уступает случаю амплитудного пространственно-временного модулятора света, т. к. нами моделировалось прямое отображение амплитудных цифровых голограмм на фазовом модуляторе, т. е. фазовый сдвиг, вносимый отсчётом модулятора, устанавливался прямо пропорциональным отсчёту плотности потока модельной цифровой голограммы.

Использование бинарных амплитудных и фазовых пространственно-временных модуляторов света позволяет в 3÷8 раз увеличить дифракционную эффективность при значительном ухудшении качества восстановленного изображения (σ около 0,4).

Следует отметить, что для совокупности использованных при моделировании 20 диффузных объектов разброс полученных величин минимального σ оказался значительным (максимально в 75 раз). В то же время максимальная дифракционная эффективность была весьма стабильна (отличия не превышают 20 %).

Полученные результаты позволяют оценивать возможное качество оптического восстановления изображений с цифровых голограмм при использовании различных типов пространственно-временных модуляторов света, а также дифракционную эффективность цифровых голограмм. Использование разработанной методики численного моделирования даёт возможность выбирать условия записи цифровых голограмм, а также тип пространственно-временного модулятора света исходя из характера решаемой задачи, которая может состоять например, в регистрации и отображении объёмных сцен в режиме реального времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13–07–00395).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 698 с.
2. Чураев А. Л., Артемова В. В. // Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии. 1990. Т. 34. С. 9.
3. Клиот-Дашинская И. М., Стаселько Д. И., Чураев А. Л. // Оптика и спектроскопия. 1980. Т. 48, № 2. С. 320.
4. Чураев А. Л. // Оптика и спектроскопия. 1992. Т. 72, № 3. С. 737.

5. Juptner W., Schnars U. Digital holography. Berlin: Springer, 2005. 164 p.
6. Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Cheryomkhin P.A., et al. // Proc. SPIE. 2012. V. 8429. Art. no. 84291M.
7. Bertaux N., Frauel Y., Javidi B., et al. // Appl. Opt. 2002. V. 41, No. 29. P. 6187.
8. Mori Y., Nomura T. // Poster Session of Digital Holography and Three-Dimensional Imaging Conference, May 9–11, 2011, Tokyo, Japan, Art. no. DTuC7.
9. Gopinathan U., Monaghan D., Hennelly B., et al. // J. Display Technol. 2008. V. 4, No. 2. P. 254.
10. Kozacki T., Kujawinska M., Finke G., et al. // J. Display Technol. 2012. V. 8, No. 4. P. 225.
11. Ferraro P., Finizio A., Gertrude A., et al. // Opt. Lett. 2010. V. 35, No. 12. P. 2112.
12. Matoba O., Hosoi K., Nitta K., et al. // Appl. Opt. 2006. V. 45, No. 35. P. 8945.
13. Zwick S., Haist T., Warber M., et al. // Appl. Opt. 2010. V. 49, No. 25. Art. no. F47.
14. Tayyar D., Sara Z., Ecevit F. // Opt. Commun. 2011. V. 284, No. 23. P. 5460.
15. Matoba O., Javidi B. // Opt. Lett. 2002. V. 27, No. 5. P. 321.
16. Haist T., Osten W., Reicherter M., et al. // Proc. SPIE. 2003. V. 5202. P. 131.
17. Baumbach T., Osten W., Juptner W., et al. // Proc. SPIE. 2004. V. 5457. P. 598.
18. Baumbach T., Osten W., Kopylow C., et al. // Appl. Opt. 2006. V. 45, No. 5. P. 925.
19. Demoli N. // Opt. Express. 2006. V. 14, No. 6. P. 2117.
20. Bouamama L., Bouafia M., Wernicke G., et al. // Catalysis Today. 2004. V. 89, No. 3. P. 337.
21. Stoykova E., Yaras F., Yontem A., et al. // Opt. Express. 2013. V. 21, No. 23. P. 28246.
22. Wyrowski F. // J. Opt. Soc. Amer. A. 1990. V. 7, No. 3. P. 383.
23. Picart P., Li J.-C. Digital Holography. London: Wiley, 2012. 358 p.
24. Charrière F., Colomb T., Montfort F., et al. // Appl. Opt. 2006. V. 45, No. 29. P. 7667.
25. <http://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/3200/4015/index.html>.
26. http://www.holoeye.com/spatial_light_modulators_pluto.html.
27. <http://www.ti.com/lscds/ti/analog/dlp/overview.page>.
28. Fienup J.R. // Appl. Opt. 1997. V. 36, No. 32. P. 8352.
29. Kohler C., Haist T., Schwab X., et al. // Opt. Express. 2008. V. 16, No. 19. P. 14853.
30. Wyrowski F., Bryngdahl O. // J. Opt. Soc. Amer. A. 1988. V. 5, No. 7. P. 1058.
31. Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Cheryomkhin P.A. // J. Opt. Technol. 2013. V. 80, No. 5. P. 301.
32. Lizana A., Moreno I., Marquez A., et al. // Opt. Express. 2008. V. 16, No. 21. P. 16711.
33. Cheryomkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., et al. // Proc. SPIE. 2014. V. 9006. Art. no. 900615.

Поступила в редакцию 11 ноября 2013 г.; принята в печать 24 июня 2014 г.

EVALUATION OF DIFFRACTION EFFICIENCY AND IMAGE QUALITY IN OPTICAL RECONSTRUCTION OF DIGITAL FRESNEL HOLOGRAMS

N. N. Evtikhiev, S. N. Starikov, P. A. Cheryomkhin, and E. A. Kurbatova

We evaluate diffraction efficiency and image quality in the process of optical reconstruction of the digital holograms, which are displayed on spatial light modulators (SLM) with 2 and 256 tone gradations. The dependencies of the above-mentioned parameters on the ratio between the intensities of the object and reference waves during recording of digital holograms are found. Numerically synthesized digital Fresnel holograms were used for modeling of optical image reconstruction. The results of the analysis were used to determine the ratios of the intensities of the object and reference waves, at which the best ratios of diffraction efficiency and quality of the optically reconstructed images are achieved in the cases of using the amplitude and phase SLMs.

Н. Н. Евтихьев, С. Н. Стариков, П. А. Черёмхин, Е. А. Курбатова

727