

32. Амплитудные ДОЭ без несущей пространственной частоты для работы в расходящихся пучках

В. В. Краснов, Р. С. Стариков

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Предложен метод синтеза самофокусирующихся амплитудных ДОЭ без несущей пространственной частоты для работы в расходящихся пучках и формирующих единственный сфокусированный порядок дифракции, который может занимать все поле реконструкции ДОЭ ввиду отсутствия необходимости пространственного разделения порядков как в случае голограмм. Синтез осуществлялся в два этапа. Первый осуществлялся итерационным алгоритмом, подобным Герчберга — Сэкстона, с теми отличиями, что синтезируемый ДОЭ амплитудный, а не фазовый, падающий волновой фронт — расходящийся сферический. Далее применялся метод прямого поиска со случайной траекторией. В результате для бинарного амплитудного ДОЭ удалось достичь значений ошибки синтеза в 7% и дифракционной эффективности 8%. Представлены результаты экспериментальной реализации ДОЭ с использованием микрозеркального модулятора света.

Ключевые слова: Амплитудный ДОЭ, Единственный порядок дифракции, Расходящийся пучок, Синтез ДОЭ, Итерационный алгоритм, Микрозеркальный модулятор света.

Цитирование: **Краснов, В. В.** Амплитудные ДОЭ без несущей пространственной частоты для работы в расходящихся пучках / В. В. Краснов, Р. С. Стариков // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 193–197.

Введение

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) широко используются в различных областях науки и техники. Наиболее популярной разновидностью ДОЭ являются голограммы, которые могут быть получены как оптическими методами, так и численными, могут быть реализованы в виде как амплитудных, так и фазовых ДОЭ. Однако, голограммам свойственны определенные недостатки. Во-первых, поскольку голограмма является результатом интерференции опорного и объектного пучков, она имеет несущую пространственную частоту, что приводит к формированию нескольких порядков дифракции, в результате чего необходимо обеспечить пространственное разделение этих порядков. Во-вторых, голограммы отличаются достаточно низкой дифракционной эффективностью, так, например, бинаризованные амплитудные голограммы имеют дифракционную эффективность порядка 2–4%.

Существует разновидность ДОЭ которые не имеют указанных проблем — киноформы. Это фазовые ДОЭ без несущей пространственной частоты, которые формируют единственный порядок дифракции при освещении плоской волной. Аналитического решения задачи синтеза киноформа в общем виде не существует, синтез осуществляется итерационными методами, обеспечивающими сравнительно небольшую ошибку синтеза. Поскольку киноформы — полностью фазовые элементы, их невозможно использовать со сверхбыстрыми

микрзеркальными модуляторами света ввиду бинарного амплитудного характера модуляции.

Целью данной работы является создание амплитудных дифракционных элементов нового типа — не имеющих несущей пространственной частоты и формирующих единственный сфокусированный порядок дифракции подобно киноформам, подходящих при этом для вывода на микрзеркальные модуляторы света.

1. Синтез новых самофокусирующихся амплитудных ДОЭ без несущей пространственной частоты

Для синтеза новых амплитудных ДОЭ без несущей пространственной частоты был разработан итерационный алгоритм. Для того чтобы получить единственный сфокусированный порядок дифракции, ДОЭ должен освещаться расходящейся волной определённого радиуса кривизны. Таким образом, требуемое световое распределение сформируется в первом порядке дифракции на определенном расстоянии от ДОЭ (Френель) или на бесконечности (Фурье).

Синтез ДОЭ нового типа осуществлялся в два этапа. Первый — предварительный, идеологически основан на методе Герчберга — Сэкстона [1]. Сперва в качестве первого приближения ДОЭ генерируется случайная амплитуда, которая умножается на амплитуду и фазу сферической волны заданного радиуса. Затем посредством преобразования Фурье переходим в плоскость изображения. Здесь амплитуду получившегося светового распределения заменяем на требуемую, а фазу сохраняем. Выполняем обратное преобразование. В получившемся амплитудно-фазовом распределении фазу заменяем на сферическую, а амплитуду сохраняем. Далее повторяем эти шаги до начала стагнации значения целевой функции в роли которой выступала суперпозиция нормированного среднеквадратического отклонения и дифракционных потерь. В конце осуществляем бинаризацию получившегося ДОЭ. На этом завершается первый этап и начинается второй.

Далее, для снижения ошибки синтеза, был применен метод прямого поиска со случайной траекторией [2, 3]. Элементы ДОЭ поочередно изменяются в соответствии со случайной траекторией обхода, при снижении значения целевой функции изменение сохраняется, в противном случае — отбрасывается.

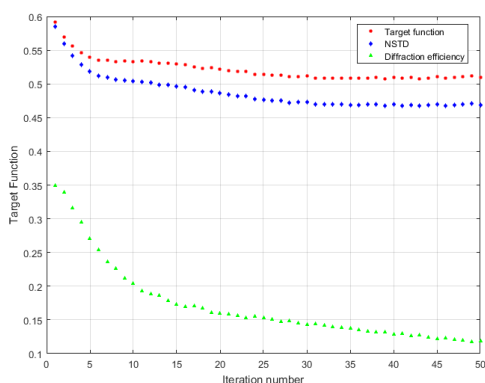
В качестве целевой функции (ЦФ) была использована суперпозиция нормированного среднеквадратического отклонения (НСКО) реконструированного распределения от исходного и дифракционной эффективности (ДЭ), определяемой как доля световой энергии не идущая на формирование изображения.

$$\text{ЦФ} = \alpha \cdot \text{НСКО} + (1 - \alpha) \cdot (1 - \text{ДЭ}),$$

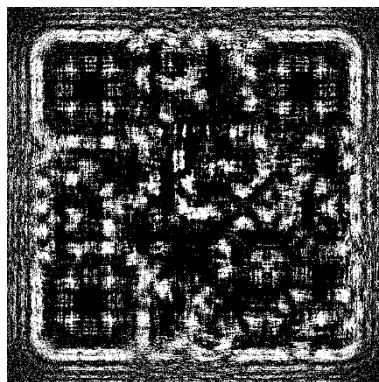
где α — весовой коэффициент.



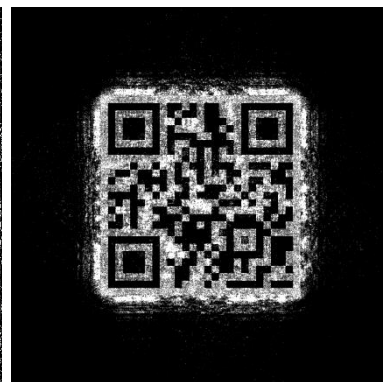
Рис. 1. Расчетное поле реконструкции с тестовым объектом (QR-код)



а) Зависимости НСКО, дифракционной эффективности и целевой функции от числа итераций первой фазы синтеза



б) Результат первой фазы синтеза бинарного амплитудного ДОЭ нового типа



в) Результат численной реконструкции ДОЭ нового типа

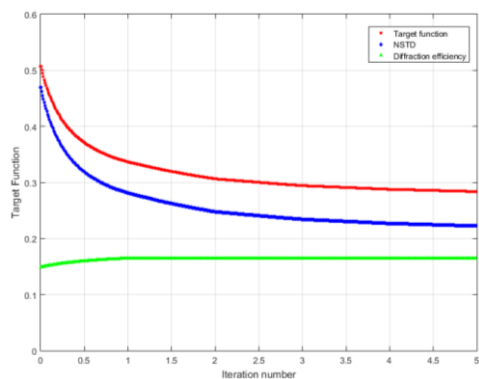
Рис. 2. Результаты первой фазы синтеза бинарного амплитудного ДОЭ нового типа

2. Результаты экспериментов по синтезу и оптической реконструкции ДОЭ нового типа с использованием микрозеркального модулятора света

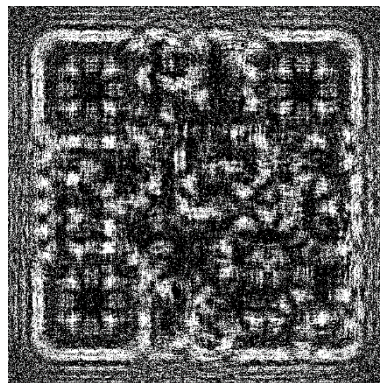
В качестве тестового изображения использовался QR-код размером 540×540 элементов. Он был помещен по центру поля реконструкции размером 1024×1024 элементов (рисунок 1).

Весовой коэффициент α был равен 0,9. Зависимости НСКО, дифракционной эффективности и целевой функции от числа итераций первой фазы синтеза представлены на рисунке 2а. Результат первой фазы синтеза бинарного амплитудного ДОЭ нового типа представлен на рисунке 2б. Минимальное значение целевой функции было получено на 39 итерации, при этом НСКО составило 0,47, дифракционная эффективность — 0,15. Результат численной реконструкции представлен на рисунке 2в.

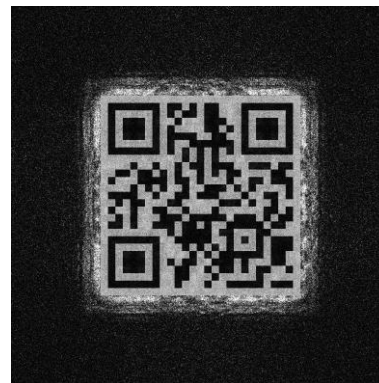
Вторая фаза синтеза осуществлялась с использованием метода ППСТ [2, 3]. В качестве стартового распределения использовался ДОЭ, полученный в результате первой фазы синтеза. Зависимости НСКО, дифракционной эффективности и целевой функции от числа итераций для второй фазы синтеза представлены на рисунке 3а. В результате второй фазы синтеза



а) Зависимости НСКО, дифракционной эффективности и целевой функции от числа итераций второй фазы синтеза



б) Результат второй фазы синтеза бинарного амплитудного ДОЭ нового типа



в) Результат численной реконструкции ДОЭ нового типа

Рис. 3. Результаты второй фазы синтеза бинарного амплитудного ДОЭ нового типа



Рис. 4. Результат оптической реконструкции бинарного амплитудного ДОЭ нового типа

НСКО снизилось с 0,47 до 0,23, а дифракционная эффективность выросла с 0,15 до 0,16. Бинарный амплитудный ДОЭ нового типа, полученный в результате второй фазы синтеза, представлен на рисунке 3б. Результат его численной реконструкции приведен на рисунке 3в.

Была произведена оптическая реконструкция ДОЭ представленного на рисунке 3б с использованием микрозеркального модулятора света Texas Instruments Discovery DLP9500BFLN. Излучение гелий-неонового лазера длиной волны 633 нм фокусировалось на микродиафрагме, выполнявшей роль точечного источника света, освещающего микрозеркальный модулятор, расположенный на расстоянии 40 см от микродиафрагмы. Свет, отраженный от модулятора, попадал на камеру, расположенную на расстоянии 50 см от модулятора. Результат оптической реконструкции бинарного амплитудного ДОЭ нового типа (рисунок 3б) представлен на рисунке 4.

Заключение

В работе осуществлен синтез и экспериментальная апробация амплитудного дифракционного элемента нового типа без несущей пространственной частоты, формирующего единственный сфокусированный порядок дифракции. Результаты оптической реконструкция с

использованием микрзеркального модулятора света демонстрируют хорошее качество и высокую по сравнению с голограммами дифракционную эффективность.

Список источников

- [1] **Gerchberg, R. W.** A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane picture / R. W. Gerchberg, W. O. Saxton / *Optik*. — 1969. — Vol. 2. — P. 237–246.
- [2] **Evtikhiev, N. N.** A method of generating amplitude masks with a constant power spectra and using them to measure the two-dimensional modulation-transfer functions of optical systems / N. N. Evtikhiev, V. V. Krasnov, S. N. Starikov // *Journal of Optical Technology*. — 2013. — Vol. 80. — P. 294–300.
- [3] **Krasnov, V. V.** Analysis of performance of the direct search with random trajectory method applied to the task of minimization of kinoform synthesis error / V. V. Krasnov // *Proc. of SPIE*. — 2016. — Vol. 10022. — P. 1002226.