

Рис. 5

сумма функционала правдоподобия применим также при обработке сигналов другого вида, например, полученных от штриховых объектов. Это обеспечивает решение проблемы пространственной калибровки расположения измерительных каналов, «привязки» точки измерения дробной части порядка интерференции к заданной точке объекта или совокупности таких точек в автоматизированных высокоточных измерительных системах нового поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптический производственный контроль /Под ред. Д. Малакары.—М.: Машиностроение, 1985.
2. Гуров И. П. Интерференционные фотоэлектрические системы на основе приборов с зарядовой связью для линейных измерений // Материалы краткосрочного семинара «Опыт внедрения прогрессивных средств и методов размерного контроля». —Л.: ЛДНТП, 1990.
3. Гуров И. П., Павлова А. Б. Определение положения отражающей поверхности второго порядка методом машинной обработки интерференционной картины // Автометрия.—1990.—№ 3.
4. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов.—М.: Радио и связь, 1983.
5. Щербак В. И. Оптимальная оценка параметров оптических сигналов по критерию максимального правдоподобия // Измер. техника.—1987.—№ 7.
6. Гуров И. П., Нагибина И. М., Павлова А. Б. Применение метода дискретизации интерференционной картины для измерения перемещений сферической поверхности // Опт.-мех. пром-сть.—1988.—№ 9.
7. Гуров И. П. Методы и техника автоматической обработки сигналов в интерференционных измерительных системах // Измерения, контроль, автоматизация.—М.: Информприбор, 1990.—Вып. 2(74).
8. Saunders J. V. Ball and cylinder interferometer // J. Res. NBS.—1972.—76C, N 1 and 2.—P. 11.

Поступила в редакцию 23 июля 1991 г.

УДК 535.853

Л. Л. Досколович, В. А. Соيفер, М. В. Шинкарев
(Самара)

МЕТОД СТОХАСТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА БИНАРНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК

Предложен метод стохастического синтеза бинарных дифракционных решеток. Метод основан на случайном переборе координат штрихов профиля решетки. По данному методу приведены результаты расчетов решеток с числом равных

порядков от 5 до 41. Энергетическая эффективность полученных решеток составляет 78—83 % при 1—10 %-ном среднеквадратичном отклонении энергии в порядках от требуемого равномерного распределения.

Многopорядковые фазовые дифракционные решетки с равной интенсивностью света в порядках дифракции широко используются в оптических светоделительных и мультиплицирующих устройствах.

В работе [1] предложено применять для расчета фазового профиля многопорядковой дифракционной решетки итеративный алгоритм Герчберга — Секстона [2]. Этот метод позволяет получить непрерывное распределение фазы по периоду решетки. Однако наиболее технологичны и просты в изготовлении с помощью методов фотолитографии бинарные фазовые дифракционные решетки [3], функция фазовой модуляции которых принимает только два значения: 0 и φ .

Их периодическая структура состоит из прямоугольных штрихов одинаковой высоты, но различной ширины и может быть реализована путем однократного химического травления подложки. В [3] для расчета фазового профиля периода бинарной решетки предлагается численно решать в диалоговом режиме нелинейную систему алгебраических уравнений. При этом авторам [3] удалось синтезировать решетки с числом порядков равной интенсивности до 35 при энергетической эффективности 60—80 %.

В [4] рассматривается метод стохастического синтеза фазовых дифракционных решеток при конечном числе возможных значений фазы. При этом фазовый профиль решетки задается набором эквидистантных отсчетов. Метод основан на случайном переборе конфигураций фазового рельефа. В [4] не приведены результаты по синтезу бинарных решеток. Однако поскольку ширина минимального штриха бинарных решеток составляет (по данным [3]) сотые доли периода, то применение в этом случае метода [4] для хорошей передачи конфигурации штрихов потребует задания нескольких сотен отсчетов фазы, что приведет к существенным вычислительным затратам.

В данной работе предложен метод стохастического синтеза бинарных дифракционных решеток, который позволяет формировать 35 и более порядков дифракции при энергетической эффективности 78—83 % и при 1—10 %-ном среднеквадратичном отклонении полученного распределения интенсивности в порядках от требуемого распределения. В отличие от [3] предлагаемый метод прост в реализации и не требует решения нелинейной системы уравнений; а в отличие от метода [4] связан с существенно меньшими вычислительными затратами.

Профиль бинарной решетки состоит из K прямоугольных штрихов одинаковой высоты, но различной ширины (рис. 1). Предлагаемый метод синтеза бинарных решеток основан на случайном поиске координат границ штрихов. Координаты границ штрихов x_1, \dots, x_{2K} являются параметрами, которыми можно варьировать, добиваясь требуемого соотношения интенсивностей в порядках дифракции. Интенсивность излучения в порядках дифракции описывается формулами [3]

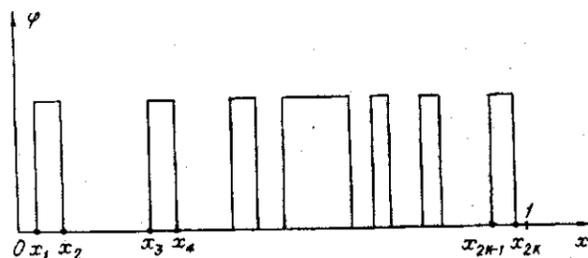


Рис. 1

$$\begin{cases} I_l = \frac{\sin^2(\varphi/2)}{\pi^2 l^2} (C_l^2 + S_l^2), & l \neq 0, l = \pm 1, \pm 2, \dots, \\ I_0 = 1 - 4Q(1 - Q)\sin^2(\varphi/2), & l = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где I_l — интенсивность света в l -м порядке дифракции, $C_l = \sum_{i=1}^{2K} (-1)^i \times \times \cos(2\pi l x_i)$, $S_l = \sum_{i=1}^{2K} (-1)^i \sin(2\pi l x_i)$, $Q = \sum_{i=1}^{2K} (-1)^i x_i$, φ — параметр, соответствующий фазовой модуляции штриха решетки.

Анализ (1) показывает, что $I_l = I_{-l}$. Вследствие симметрии для синтеза бинарной N -порядковой решетки формально требуется $N/2$ свободных параметров, т. е. число штрихов на периоде должно удовлетворять соотношению $K \geq N/4$.

В качестве критерия оптимизационного процесса примем квадратичную функцию невязки:

$$\epsilon = \frac{1}{N} \sum_{l=-N/2}^{N/2} (I_l - I_l^*)^2, \quad (2)$$

где I_l^* — требуемые интенсивности дифракционных порядков.

Реализация предлагаемого метода основана на последовательных генерациях случайных последовательностей из $2K$ чисел x_1, \dots, x_{2K} , равномерно распределенных на периоде решетки $T = 1$. Полученная последовательность упорядочивается по возрастанию и рассматривается как массив координат штрихов, при этом функция фазовой модуляции полагается равной φ на интервалах (x_i, x_{i+1}) , i нечетное, и нулю на интервалах (x_i, x_{i+1}) , i четное. Метод выбора параметра φ на каждом шаге алгоритма описан ниже.

Для полученного профиля вычисляются коэффициенты I_l и значения критерия оптимизации (2). Описанный процесс многократно повторяется. В процессе выполнения алгоритма запоминается лучшая конфигурация профиля решетки по критерию минимума невязки (2).

После проведения достаточного числа итераций (в приведенных ниже примерах число итераций 500—1000) начинается коррекция полученного оптимального набора координат границ штрихов. При этом каждую из координат границ штрихов изменяют на случайную величину, равномерно распределенную в интервале $(-\alpha, \alpha)$, где α первоначально соответствует средней ширине штриха. Описанная процедура коррекции координат штрихов последовательно повторяется с плавным уменьшением значения α .

Рассмотрим вопрос о выборе параметра φ фазовой модуляции штриха в описанном алгоритме. Из (1) следует, что значение $\varphi = \pi$ является оптимальным при синтезе решетки без учета нулевого порядка. При учете нулевого порядка предлагаются два метода. В первом методе φ может рассматриваться как дополнительный параметр оптимизации. При этом для каждой конфигурации штрихов требуется вычислять критерий (2) при различных φ . Вычисление коэффициентов I_l для разных φ не требует полного пересчета и реализуется простым правилом:

$$\begin{cases} I_l^\varphi = \sin^2(\varphi/2) I_l^\pi, & l \neq 0, l = \pm 1, \pm 2, \dots, \\ I_0^\varphi = 1 + \sin^2(\varphi/2) (I_0^\pi - 1), & l = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где I_l^π, I_0^π — интенсивности в порядках при фазовой модуляции штрихов $\varphi = \pi$ соответственно. Вторым методом состоит в расчете решетки без учета нулевого порядка при $\varphi = \pi$. Далее выбором φ можно обеспечить требуемую величину нулевого порядка. Для получения равной энергии в порядках положим в (1)

$\varphi = 2\arcsin(\sqrt{N/(E_0 + \theta N)})$, где $E_0 = \sum_{\substack{l=-N/2 \\ (l \neq 0)}}^{N/2} I_l^2$ — энергетическая эффективность исходной решетки без нулевого порядка; $\theta = 4Q(1 - Q)$. Тогда, согласно формулам пересчета коэффициентов (3), величина нулевого порядка будет равна среднему значению интенсивности в порядках $I_0^* = \frac{1}{N} \sum_{\substack{l=-N/2 \\ (l \neq 0)}}^{N/2} I_l^2$. Проводя несложные вычисления, легко показать, что общая энергетическая эффективность решетки при учете нулевого порядка увеличивается на величину

$$\Delta E = E_0 \left(\frac{N+1 - E_0 - \theta N}{E_0 + \theta N} \right).$$

В таблице приведены результаты расчетов по описанному алгоритму бинарных фазовых решеток для различного числа порядков. В третьей колонке таблицы указаны значения энергетической эффективности, а в четвертой — значения среднеквадратичного отклонения от среднего значения:

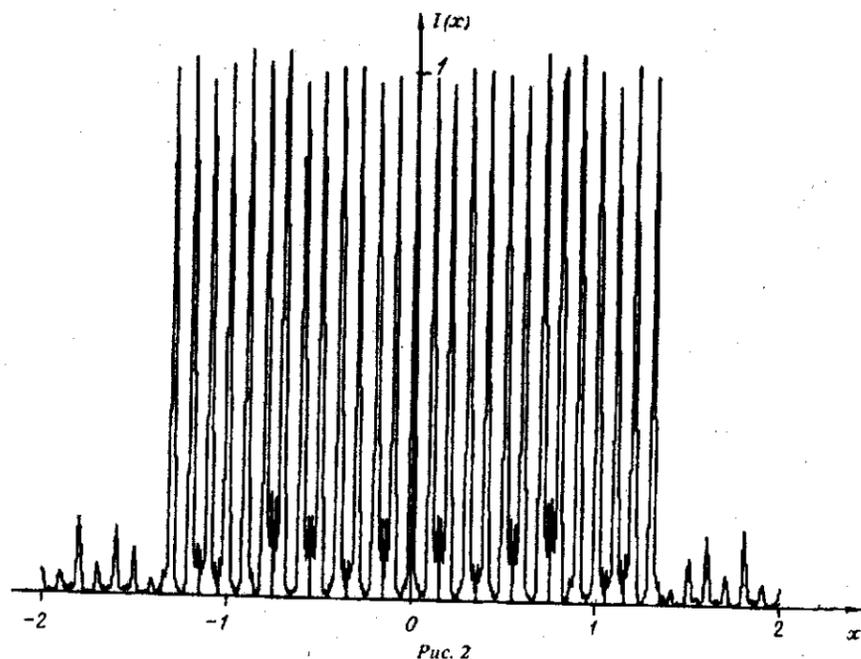
$$\delta = \frac{1}{I} \left[\frac{1}{N} \sum_l (I_l - \bar{I})^2 \right]^{1/2},$$

где $\bar{I} = \frac{1}{N} \sum_l I_l$ — среднее значение. В пятой колонке таблицы для сравнения

приведены значения максимальной эффективности решеток, полученных в [3] (* соответствует отсутствию в [3] результатов по аналогичным решеткам).

Данные таблицы показывают, что несмотря на простоту метод эффективен. Во-первых, оказалось несложным рассчитать 41-порядковую решетку, в то время как по методу [3] не удалось получить более 35 равных порядков. Во-вторых, полученные решетки обладают более высокой (на 1,5—7%) энергетической эффективностью. Решетки с числом порядков от 15 до 41 получены при фазовой модуляции штриха $\varphi = \pi$. Поскольку $\left. \frac{dI_l}{d\varphi} \right|_{\varphi=\pi} = 0, l \neq 0$, то такие решетки наиболее устойчивы к отклонениям от номинальной глубины профиля при изготовлении. В процессе расчетов по алгоритму установлено, что при числе порядков больше 15 варьирование фазовой модуляцией штриха

Число порядков N	Число штрихов K	Энергетическая эффективность, %	Среднеквадратичное отклонение от среднего значения, %	Энергетическая эффективность по методу [3], %
5	2	77,8	2,0	*
6	2	81,2	1,4	*
7	2	83,5	0,9	84
8	3	79,0	2,7	*
9	3	81,1	4,2	76
10	3	83,6	2,6	*
11	3	85,7	1,9	86
14	4	83,7	0,6	*
15	4	84,6	0,5	82
19	5	82,5	1,5	71
23	6	81,8	5,2	74
27	7	83,5	1,9	75
31	8	80,4	12,3	74,5
35	9	83,2	10,9	75
41	11	80,0	9,1	*



по методам 1, 2 не позволяет существенно улучшить решение. При малом числе порядков (7—11) оптимизация с учетом φ по методам 1, 2 позволяет повысить эффективность решетки на 3—6 %. Следует отметить быструю сходимость разработанного метода. Время счета на персональном компьютере РС/АТ-286 составляет от 5—7 мин для 5—19-порядковых решеток до 30 мин для 41-порядковой решетки.

Важным технологическим показателем бинарной решетки является ширина минимального штриха [3]. Отметим, что приведенным в таблице данным соответствуют технологичные решения с шириной минимального штриха не менее чем 0,015 периода.

На рис. 1 в качестве примера приведена фазовая функция 27-порядковой решетки, а на рис. 2 — результат моделирования на компьютере распределения интенсивности в фокальной плоскости пары решетка — линза при числе периодов решетки 4 ($T = 1$ мм), длине волны 0,001 мм и фокусном расстоянии 100 мм. Приведенный анализ полученных результатов (см. таблицу и рис. 2) подтверждает работоспособность и перспективность предложенного метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берзный А. Е., Комаров С. В., Прохоров А. М. и др. Фазовые дифракционные решетки с заданными параметрами // ДАН СССР.—1986.—287, № 3.
2. Gerchberg R. W., Saxton W. O. Practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures // Optik.—1972.—35, N 2.
3. Бобров С. Т., Туркевич Ю. Г. Многопорядковые дифракционные решетки с несимметричным профилем периода // Компьютерная оптика.—М.: МЦНТИ, 1989, № 4.
4. Turunen Jari, Vasara Antti, Westerholm Jan. Kinoform phase relief synthesis: a stochastic method // Opt. Eng.—1989.—28, N 11.

Поступила в редакцию 24 октября 1991 г.