

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОГНУТЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА АППАРАТНЫХ ФУНКЦИЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

© 2004 г. Ю. В. Бажанов, канд. техн. наук; Л. К. Тимергазеева; Н. А. Кулакова; Е. А. Тюленева
ФНПЦ "Государственный институт прикладной оптики", г. Казань

Предложена методика нахождения оптимальных параметров вогнутой дифракционной решетки и схемы для ее использования с помощью минимизации полуширины аппаратной функции спектрального прибора. Аппаратные функции рассчитаны с учетом функции пропускания прибора, зависящей от распределения освещенности и дифракционной эффективности по поверхности решетки.

Коды OCIS: 080.2740.

Поступила в редакцию 19.03.2003.

Стремление к миниатюризации спектральных приборов, а также к повышению их характеристик приводит к использованию вогнутых нарезных и голограммных дифракционных решеток с искривленными неравноотстоящими штрихами. Оптимизация параметров таких приборов представляет собой многомерную задачу, где параметрами служат параметры дифракционной решетки и схемы, в которой она используется. Решению этой проблемы посвящено достаточно много работ, основные подходы которых приведены в обзоре [1]. Из анализа этой работы следует, что оценочные функции, используемые для аналитических методов расчета, весьма просты и не в состоянии адекватно описать работу спектрального прибора, а численные методы достаточно трудоемки, при этом результаты в большей степени зависят от начальных данных.

В предлагаемом подходе поиск оптимального решения разбивается на два этапа: на первом аналитическими методами находят "глобальный" минимум функции в виде критериев качества спектрального изображения, а на втором численно оптимизируется функция, максимально полно моделирующая работу спектрального прибора. В качестве начальных данных используются результаты аналитической методики [2–4], основанной на минимизации усредненного по зрачку оптической системы квадрата поперечных аберраций, что эквивалентно минимизации пятна точечной диаграммы лучей, пересекающих плоскость изображения. Оценочной (целевой) функцией для численной оптимизации выбрана величина полуширины аппаратной функции (АФ) спектрального прибора, которая, как известно, является наиболее адекватным критерием оценки качества изображения спектрального прибора [1, 5].

При расчете АФ спектральных приборов методами геометрической оптики входной зрачок системы разбивают на большое число равновеликих элементов. Для каждой точки щели рассчитывают точечную диаграмму, т. е. вычисляют ход большого коли-

чества лучей через эти элементы и определяют координаты точек пересечения этих лучей с плоскостью изображения. Далее выполняют численное интегрирование с учетом ширины входной щели для нахождения АФ спектрографа, ширины и высоты выходной щели для определения АФ монохроматора [5].

Для учета функции пропускания прибора можно разбить зрачок на площадки, величина которых обратно пропорциональна пропусканию прибора в данной точке решетки. Однако более просто этого можно добиться, придавая каждому лучу, проходящему через дифракционную решетку, соответствующий весовой коэффициент. Поскольку величина дифракционной эффективности практически не изменяется в направлении высоты штрихов, в разработанной нами программе коэффициенты присваивались лишь каждому столбцу этого разбиения.

Функция пропускания спектрального прибора определяется главным образом изменением дифракционной эффективности и освещенности по поверхности решетки. Методы расчета дифракционной эффективности достаточно хорошо развиты для плоских решеток бесконечного размера, однако, представляя вогнутую дифракционную решетку в виде суммы элементарных плоских решеток, можно вычислить эту характеристику как в скалярном, так и в векторном приближении [6, 7]. Освещенность дифракционной решетки зависит от типа осветительной системы и источника излучения. Если используются линзовые осветительные системы, то этот фактор может не учитываться, однако в случае освещения решетки лазерным пучком или оптическим волокном освещенность на решетке будет изменяться в виде функции Гаусса, а при работе решетки с источником синхротронного излучения освещенность изменяется достаточно сложным образом и не имеет оси симметрии. В каждом из этих случаев освещенность решетки может быть рассчитана с помощью одного из известных аналитических или численных методов.

Для оптимизации параметров нами использован метод прямого поиска, хотя при отсутствии ограничений градиентные методы и методы, использующие вторые производные, сходятся быстрее. Тем не менее, в задачах с достаточно большим числом переменных довольно трудно или даже невозможно получить производные в виде аналитических функций, необходимых для градиентного алгоритма или алгоритма, использующего производные второго порядка. Хотя вычисление аналитических производных можно заменить вычислением производных с помощью разностных схем, возникающая при этом ошибка, особенно в окрестности экстремума, может ограничить применение подобной аппроксимации. Во всяком случае, методы прямого поиска не требуют регулярности и непрерывности целевой функции и существования производных [8, 9].

В качестве рабочего был выбран метод Хука-Дживса [8, 9], который хорошо себя зарекомендовал для решения задач такого рода [10]. Поиск состоит из последовательности шагов исследующего поиска вокруг базисной точки, за которой в случае успеха следует поиск по образцу, с помощью которого можно надеяться достичь большего убывания значения функции. Минимизация функции продолжается поиском в направлении, заданном образцом и т. д. Завершить этот процесс можно, когда длина шага (длины шагов) будет уменьшена до заданного малого значения [8, 9].

Оптимизация ведется по рабочей спектральной области $\lambda_1 - \lambda_m$, которая разбивается на заданное количество интервалов (количество длин волн). Оптимизируется оценочная функция вида

$$Q = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \alpha_i \bar{b}_i^n, \quad (1)$$

где $\bar{b}_i$ — полуширина АФ для i -й длины волны, а произвольные величины α_i и n являются весовыми коэффициентами, которые могут подбираться в зависимости от требований к разрешающей способности по спектру. Таким образом, оптимизация может вестись как по суммарной (средней) величине аппаратной функции, так и с помощью дополнительного задания весовых коэффициентов и показателя степени. Эти дополнения необходимы для корректировки процесса оптимизации в целях достижения результата, требуемого для конкретной работы. Например, требуется, чтобы полуширина АФ была не больше заданной величины, или средняя величина не превосходила определенного значения, или в определенном диапазоне спектральной области необходимо иметь минимум полуширины АФ и т. д. В результате такого выбора оценочной функции мы имеем возможность управления процессом оптимизации в зависимости от решаемой задачи.

В разработанной программе оптимизации предусмотрена также возможность вычисления не только полуширины АФ, но и ее ширины на заданном уровне. Это позволяет использовать критерий оценки качества спектрального изображения, отличный от классического, основанный на полуширине АФ. Например, в случае, когда требуется разрешить две спектральные линии приблизительно одинаковой интенсивности, следует минимизировать ширину АФ на уровне 0,7–0,9 от ее максимума. Если же необходимо разрешение слабой линии в непосредственной близости от более сильной, то для оптимизации следует использовать ширину АФ на уровне 0,2–0,4 от ее максимума. Очевидно, что изменение вида АФ вследствие минимизации ее ширины на различной высоте возможно лишь в ограниченных пределах и в достаточно узком спектральном диапазоне.

В качестве примера взята оптическая схема спектрографа с постоянным углом падения, равным 30° , и с расстояниями от решетки до входной щели и до фокальной кривой для средней длины волны спектрального диапазона, равными 493,7 мм. В приборе использована нарезная вогнутая решетка с радиусом кривизны $r = 500$ мм, размером заштрихованной части 50×50 мм, частотой штрихов 2400 мм^{-1} , работающая в области длин волн 180–400 нм. Закон изменения шага решетки и кривизны штрихов выражается в виде [2–5]

$$e(y) = e_0 (1 + \mu y + \nu y^2 + \xi y^3 + \Lambda), \quad (2)$$

$$\rho(y) = \rho_0 - py - qy^2, \quad (3)$$

где e_0 и ρ_0 — период и радиус кривизны в вершине решетки, а μ , ν , p и q — постоянные.

На рис. 1 приведены кривые значений полуширины АФ в зависимости от длины волны. Кривые 1 соответствуют исходным параметрам решетки, полученные с помощью аналитической оптимизации, кривые 2–4 — после численной оптимизации, при этом кривая 2 — при $n = 1$, $\alpha_i = 1$, кривая 3 — при выбранном значении n , $\alpha_i = 1$, кривая 4 — при выбранном значении коэффициентов α_i , $n = 1$. Выбор значений n и α_i проводится для получения минимальных значений $\bar{b}_i$ по рабочей области длин волн 180–400 нм, разбитой на 19 интервалов ($m = 20$). Ширина входной щели составляет 7,5 мкм. Как видно из рис. 1, полуширина АФ при исходных параметрах решетки практически равна ширине входной щели по всей спектральной области, за исключением коротковолновой части спектра, где она имеет значительно большие значения (кривая 1). После оптимизации среднего значения полуширины АФ ее величина в коротковолновой области несколько уменьшается, однако для остальных длин волн диапазона — уве-

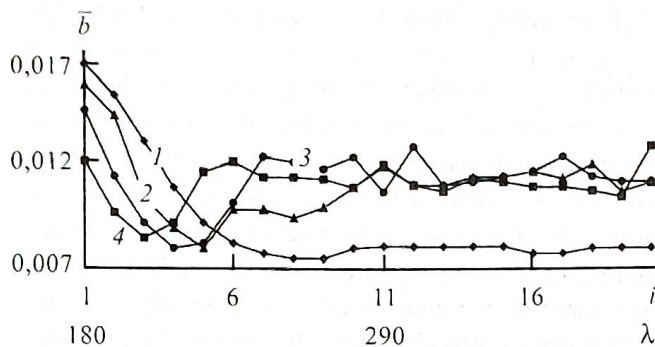


Рис. 1. Значения полуширин АФ в зависимости от длины волны при оптимизации различных целевых функций. Кривая 1 соответствует АФ до оптимизации, кривая 2 – при $n = \alpha_i = 1$, кривая 3 – при выбранном значении n и $\alpha_i = 1$, кривая 4 – при выбранном значении коэффициентов α_i и $n = 1$.

личивается (кривая 2). Введение показателя степени $n = 15$ дает некоторое уменьшение значений АФ для $\lambda = 180$ нм (кривая 3). Лучшие результаты были достигнуты в случае $n = 1$ при выборе коэффициентов $\alpha_i = 1$, за исключением $\alpha_1 = 100$ ($\lambda = 180$ нм) (кривая 4). В результате $\bar{b} \leq 0,012$ мм по всей рабочей области спектрографа. Для более точной оптимизации необходимо, например, выбрать $\alpha_3 \ll 1$ ($\lambda = 203$ нм) и т. д. Кроме этого, для получения более гладких кривых необходимо увеличить количество рассчитываемых лучей, длин волн и интервалов разбиения по ширине спектральной области. Параметры μ и ν нарезной решетки, соответствующие кривым 1–4, приведены в табл. 1.

На рис. 2 приведены аппаратные функции без учета и с учетом функции пропускания (кривые 1 и 2). Как видим, положения максимумов и полуширины кривых значительно различаются. Коэффициенты, характеризующие функцию пропускания прибора, представляющую собой изменение дифракционной эффективности по поверхности нарезной дифракционной решетки, приведены в табл. 2.

Таблица 1. Параметры решетки для различных целевых функций

Параметры	$\mu \times 10^3$	$\nu \times 10^6$
исходные	-0,39016	0,4400
$n = 1, \alpha_i = 1$	-0,39195	0,4894
$n \neq 1, \alpha_i = 1$	-0,39200	0,5079
$n = 1, \alpha_i \neq 1$	-0,39020	0,5449

Таблица 2. Коэффициенты, характеризующие распределение дифракционной эффективности по поверхности решетки

y	-25	-19	-12,5	-6,25	0	6,25	12,5	19	25
P_j	0,34	0,55	0,66	0,78	0,76	0,59	0,33	0,09	0

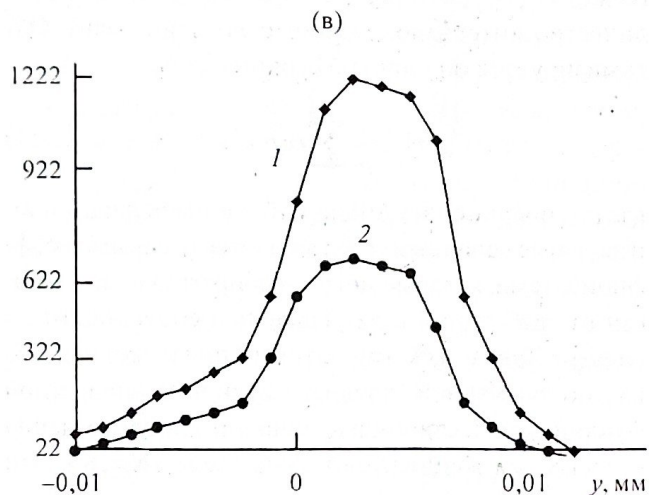
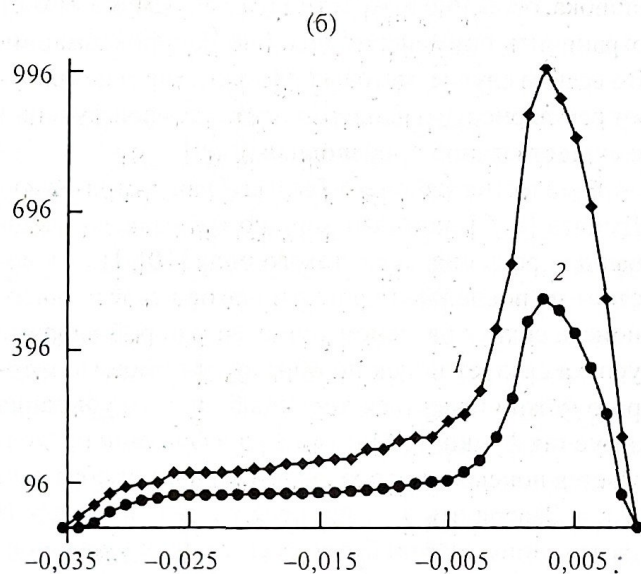
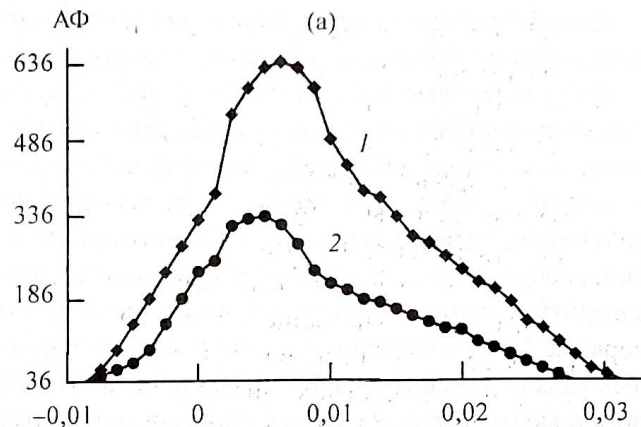


Рис. 2. Значения АФ для а) $\lambda = 180$ нм, б) $\lambda = 290$ нм, в) $\lambda = 400$ нм. Кривая 1 соответствует АФ без учета коэффициента пропускания, кривая 2 с учетом коэффициента пропускания.

Как показывают расчеты, предлагаемый метод является методом локального поиска, поэтому его использование целесообразно на последней стадии расчетов, когда приблизительно известны параметры решетки и оптической схемы прибора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пейсахсон И.В. Оптимизация параметров оптических систем спектральных приборов // Оптический журнал. 1995. № 12. С. 3–11.
2. Бажанов Ю.В. Расчет параметров неклассических вогнутых дифракционных решеток в схемах монохроматоров с фиксированными щелями // ОМП. 1983. № 9. С. 2–5.
3. Бажанов Ю.В. Определение оптимальных параметров вогнутых дифракционных решеток в установках на круге Роуланда // Опт. и спектр. 1983. Т. 55. В. 6. С. 1053–1058.
4. Нагулин Ю.С., Бажанов Ю.В., Зайнуллина Л.К., Стрезнев С.А. // Патент РФ № 1522048, 1993.
5. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975. 312 с.
6. Neviere M., Hunter W.R. Analysis of the changes efficiency across the ruled area of a concave diffraction grating // Appl. Opt. 1980. V. 19. № 12. P. 2059–2065.
7. Бажанов Ю.В., Кулакова Н.А. Анализ эффективности вогнутых дифракционных решеток в скалярном приближении // Оптический журнал. 2002. Т. 70. № 12. С. 40–43.
8. Хеммельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 534 с.
9. Банди Б. Методы оптимизации. М.: Радио и связь, 1988. 128 с.
10. Бажанов Ю.В., Шапошников С.Н. Фокусирующая решетка на вогнутой поверхности оптического волновода // Оптический журнал. 1996. № 11. С. 47–50.