

УДК 535.4

В. А. Соيفер, Л. Л. Досколович, И. В. Катина, С. И. Харитонов

(Самара)

ФОКУСИРОВКА В ОТРЕЗОК ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРОТЯЖЕННОГО НЕКОГЕРЕНТНОГО
КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА

Получены уравнения для решения задачи фокусировки от плоского некогерентного квазимонохроматического источника в двумерную область с заданным распределением интенсивности. Приведен пример расчета фазового элемента для фокусировки излучения от тонкой некогерентной нити в отрезок.

Имеется широкий спектр работ, посвященных решению задачи фокусировки когерентного излучения в плоские области и кривые линии с заданным распределением интенсивности [1—5]. В то же время в ряде практически важных случаев, например при проектировании светотехнических устройств, требуется фокусировка частично-когерентного света. В данной статье рассмотрен метод расчета дифракционных оптических элементов (ДОЭ), предназначенных для фокусировки излучения плоского некогерентного квазимонохроматического источника в двумерную область с требуемым распределением интенсивности. В качестве примера проведен расчет фазового ДОЭ для фокусировки излучения тонкой некогерентной нити в отрезок линии, параллельный освещающей нити.

Решение задачи фокусировки излучения от плоского некогерентного источника. Рассмотрим геометрические условия задачи фокусировки. Излучение от квазимонохроматического пространственно-некогерентного плоского источника S , расположенного в плоскости $u' = (u', v')$ при $z = -l$, падает на фазовый оптический элемент G с фазовой функцией $\Psi(u)$, находящийся в плоскости $u = (u, v)$ при $z = 0$ (рис. 1). Задача состоит в отыскании фазовой функции элемента $\Psi(u)$ из условия формирования в плоскости $x = (x, y)$ при $z = f$ светового поля с требуемым распределением интенсивности $I(x)$.

Получим интегральные уравнения для нахождения фазовой функции $\Psi(u)$. Пусть $I_0(u)$ — функция распределения интенсивности в плоскости источника S . Согласно теореме Ван Циттерта — Цернике, функция взаимной

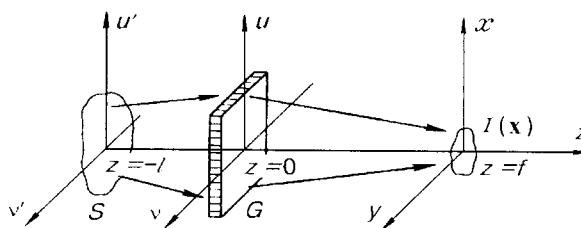


Рис. 1. Геометрические условия задачи фокусировки

интенсивности излучения, падающего на оптический элемент G , в парапаксиальном приближении имеет вид [6]:

$$I(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2) = \exp\left(\frac{ik}{2l}(\mathbf{u}_1^2 - \mathbf{u}_2^2)\right) \tilde{I}(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2), \quad (1)$$

где

$$\tilde{I}(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2) = \frac{1}{l^2} \int_S I_0(\mathbf{u}') \exp\left(-\frac{ik}{l}(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2)\mathbf{u}'\right) d^2\mathbf{u}'; \quad (2)$$

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\bar{\lambda}$ — средняя длина волны излучения. При этом распределение интенсивности в фокальной плоскости $z = f$ имеет вид [6]:

$$I(\mathbf{x}) = \frac{1}{(\bar{\lambda}f)^2} \int_G I(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2) \exp\left[\frac{ik}{2f}((\mathbf{x} - \mathbf{u}_1)^2 - (\mathbf{x} - \mathbf{u}_2)^2)\right] \times \\ \times \exp\left[i(\Psi(\mathbf{u}_1) - \Psi(\mathbf{u}_2))\right] d^2\mathbf{u}_1 d^2\mathbf{u}_2. \quad (3)$$

Для простоты вычислений фазовую функцию ДОЭ удобно представить как

$$\Psi(\mathbf{u}) = -\left(\frac{1}{l} + \frac{1}{f}\right) \frac{k\mathbf{u}^2}{2} + \varphi(\mathbf{u}). \quad (4)$$

Подставляя выражения (1), (2), (4) в (3), запишем распределение интенсивности в фокальной плоскости в виде

$$I(\mathbf{x}) = \frac{1}{l^2} \int_S I_0(\mathbf{u}') h_f\left(\mathbf{x} + \frac{\mathbf{u}'f}{l}\right) d^2\mathbf{u}', \quad (5)$$

где

$$h_f(\mathbf{x}) = \left| \frac{1}{\bar{\lambda}f} \int_G \exp[i\varphi(\mathbf{u})] \exp\left[-\frac{ik}{f}\mathbf{x}\mathbf{u}\right] d^2\mathbf{u} \right|^2. \quad (6)$$

Таким образом, расчет фазовой функции элемента $\Psi(\mathbf{u})$, обеспечивающего требуемое распределение интенсивности $I(\mathbf{x})$, сводится к последовательному решению интегральных уравнений (5), (6). Уравнение (5) является интегральным уравнением Фредгольма второго рода относительно функции $h_f(\mathbf{x})$. Решение уравнения (5) необходимо искать в классе функций $h_f(\mathbf{x}) \geq 0$. Функция $h_f(\mathbf{x})$ в теории некогерентных оптических систем соответствует функции рассеяния точки. Интересно отметить, что решение уравнения (6) эквивалентно расчету фазовой функции $\Psi(\mathbf{u})$ ДОЭ из условия фокусировки когерентного сходящегося сферического пучка в двумерную область с распределением интенсивности $h_f(\mathbf{x})$ [1, 2].

Для расчета фазовой функции $\Psi(\mathbf{u})$ могут быть использованы аналитические методы расчета фокусаторов [1—5, 7] или итерационные процедуры типа алгоритма Герчберга — Секстона [8, 9].

Фокусировка излучения от тонкой некогерентной нити в отрезок. Рассмотрим решение задачи фокусировки некогерентного излучения от нити с интенсивностью

$$I(u', v') \sim \delta(v') \exp\left(-\frac{u'^2}{\sigma^2}\right)$$

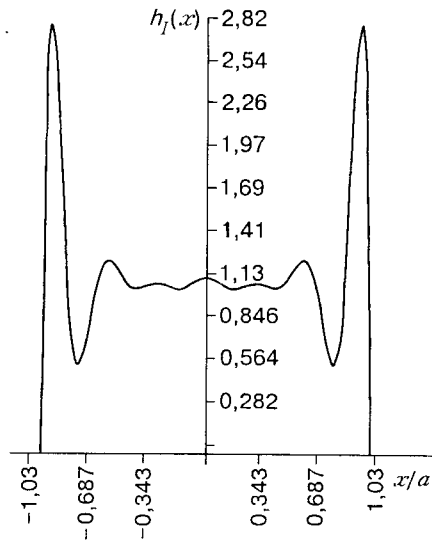


Рис. 2. Функция $h_l(x)$

в отрезок с распределением интенсивности, соответствующим супергауссу 24-го порядка:

$$I(x, y) \sim \delta(y) \exp\left(-\frac{x^{24}}{a^{24}}\right). \quad (7)$$

Апертуру оптического элемента предполагаем квадратной с размером $2b \times 2b$. Для рассматриваемого случая задача сводится к расчету одномерной функции $\varphi(u)$ из условия фокусировки в отрезок с распределением интенсивности

$$I_1(x) \sim \exp\left(-\frac{x^{24}}{a^{24}}\right). \quad (8)$$

При этом фазовая функция ДОЭ определяется уравнением (4).

Для отыскания функции $\varphi(u)$ необходимо сначала решить уравнение (5) относительно функции $h_l(x)$. По рассчитанной $h_l(x)$ определяется функция $\varphi(u)$ из уравнения (6).

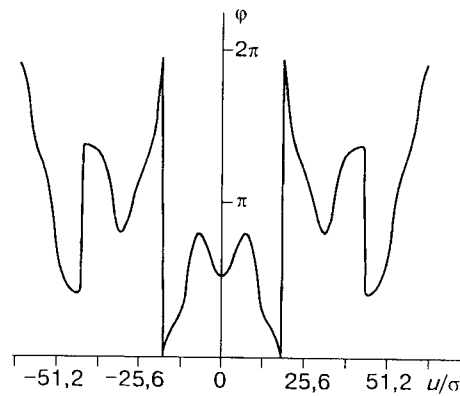


Рис. 3. Функция $\varphi(u)$, рассчитанная из условия формирования распределения интенсивности $h_l(x)$ на рис. 2

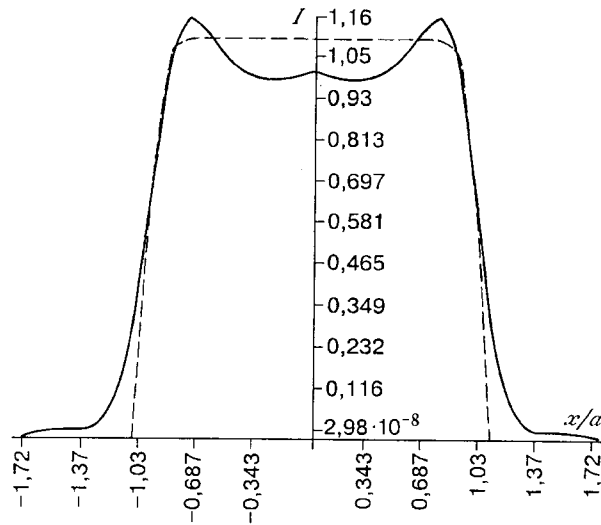


Рис. 4. Расчетное распределение интенсивности (сплошная линия) и заданное распределение интенсивности (штриховая линия) при фокусировке излучения от некогерентной нити в отрезок

Запишем уравнение (5) в операторном виде

$$Ah_{11} = I_1. \quad (9)$$

Для решения уравнения (5) использовался итерационный алгоритм [10], основанный на разложении обратного оператора A^{-1} в ряд Неймана. С учетом ограничения на неотрицательность решения итерационный алгоритм расчета $h_i(x)$ имеет вид:

$$h^{k+1}(x) = I_1 + (I - A)Ph^k(x), \quad (10)$$

где

$$Pf(x) = \begin{cases} f(x), & f(x) \geq 0; \\ 0, & f(x) < 0. \end{cases}$$

Расчет проводился при следующих физических параметрах (мм): $\sigma = 0,100$, $f = l = 200$, $a = 0,466$, $b = 6,400$.

Расчитанная по алгоритму (10) функция $h_i(x)$ приведена на рис. 2. По функции $h_i(x)$ на основе (6) была найдена функция $\varphi(u)$, показанная на рис. 3. Для расчета $\varphi(u)$ использовался алгоритм Герцберга — Секстона. Распределение интенсивности вдоль отрезка фокусировки для расчитанной функции $\varphi(u)$ приведено на рис. 4.

Среднеквадратичное отклонение δ расчитанного распределения интенсивности вдоль отрезка фокусировки (сплошная линия на рис. 4) от заданного распределения (штриховая линия) составило 12,5 %. Полученное решение учитывает конечный радиус когерентности пучка, освещающего ДСЭ. Отметим, что использование для фокусировки излучения от некогерентной нити ДОЭ с фазовой функцией, расчитанной на фокусировку когерентного пучка, приводит к среднеквадратичной ошибке $\delta > 100$ %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голуб М. А., Досколович Л. Л., Казанский Н. Л. и др. Метод согласованных прямоугульников для расчета фокусаторов в плоскую область // Компьютерная оптика. 1990. № 10. С. 42.
2. Golub M. A., Doscolovich L. L., Kazanskiy N. L. et al. Diffraction investigation of focusators into plane area // Proc. SPIE. 1993. 1983. P. 647.
3. Данилов В. А., Попов В. В., Прохоров А. М. и др. Оптические элементы, фокусирующие излучение в произвольную фокальную линию. М., 1983. (Препр. /ФИАН СССР; 69).
4. Гончарский А. В., Степанов В. В. Обратные задачи когерентной оптики. Фокусировка в линию // ЖВМиМФ. 1986. 26, № 1. С. 80.
5. Голуб М. А., Казанский Н. Л., Сисакян И. Н. и др. Дифракционный расчет оптического элемента, фокусирующего в кольцо // Автометрия. 1987. № 6. С. 8.
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Мир, 1973.
7. Гончарский А. В. Математические модели в задачах синтеза плоских оптических элементов // Компьютерная оптика. 1987. № 1. С. 24.
8. Воронцов М. А., Матвеев А. Н., Сивконь В. П. К расчету фокусаторов лазерного излучения в дифракционном приближении // Компьютерная оптика. 1989. № 1. С. 74.
9. Троицкий И. Н., Сафонов А. Н., Демин А. А. Киноформ: синтез и применение // Зарубеж. радиоэлектрон. 1978. № 9. С. 3.
10. Василенко Г. И., Тараторин А. М. Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986. С. 131.

Поступила в редакцию 19 декабря 1996 г.

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!