

文章编号:1002-2082(2008)04-0661-04

光束通过含环形光阑的光学系统的传输特性研究

韩勇¹, 吴健¹, 杨春平¹, 何武光¹, 徐光勇¹, 叶征宇²

(1. 电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054; 2. 北京 947 信箱, 北京 100000)

摘要: 采用将环形光阑的窗口函数展开的傅里叶级数与复高斯函数的乘积的方法,推导出平面波经过含环形光阑光学系统的近似解析传输公式。利用该公式对光束通过含环形光阑的光学系统的传输进行了数值模拟,计算并分析了不同遮拦比下轴上光强分布和横向光强分布的特点。结果表明:轴上光强分布和横向光强分布与环形光阑的遮拦比有关。该研究方法和结果可推广到其他光阑,对控制光束和光学系统设计具有一定的参考价值。

关键词: 环形光阑;遮拦比;光束传输;复高斯函数

中图分类号: TN012-34

文献标志码: A

Propagation characteristics of beam passing through optical system with annular diaphragm

HAN Yong¹, WU Jian¹, YANG Chun-ping¹, HE Wu-guang¹,
XU Guang-yong¹, YE Zheng-yu²

(1. School of Opto-electric Information, UESTC, Chengdu 610054, China;

2. Mail Box 947, Beijing 100000, China)

Abstract: An approximately analytical propagation formula of plane wave passing through a system with annular diaphragm was derived with the method of expanding the window function of the annular diaphragm into the product of Fourier series and complex Gaussian functions. The beam propagation through the optical system with the annular diaphragm was numerically simulated with the formula. On-axial and transverse intensity distribution is calculated and analyzed. The numerical simulation results show that the intensity distribution is related to the obstruction ratio of the annular diaphragm.

Key words: annular diaphragm; obstruction ratio; beam propagation; complex Gaussian function

引言

对光束通过含硬边光阑的复杂光学系统传输的计算模拟,通常需要直接从 Collins 公式出发作数值积分,但比较耗时^[1]。J. J. Wen 和 M. A. Breazeale 提出用有限个复高斯函数之和来拟合硬边光阑窗口函数的方法^[2],使光束通过硬边光阑的传输可用解析公式近似描述。但是,由于所用函数不能很好地拟合窗口函数,因此存在计算误差,且

近场误差还比较大。赵光普等人利用傅里叶级数和复高斯函数构建新的函数^[3],更好地拟合了窗口函数,在兼顾机时的情况下,进一步提高了计算精度,取得了比较好的结果。本文利用该方法,推导了环形光阑窗口函数的表达式。数值模拟了激光通过含环形光阑的光学系统的传输特性,计算并分析了不同遮拦比情况下,轴上光强分布情况和焦平面上的光强分布特征。

收稿日期:2007-05-14; 修回日期:2007-06-08

作者简介:韩勇(1978—),男,湖北襄樊人,硕士研究生,主要从事激光在大气湍流中的传输特性的研究。

E-mail: 518hh@163.com

1 平面波经过含环形光阑光学系统传输的解析公式

不失一般性,设入射光为单位振幅的平面波,经过含圆孔光阑复杂光学系统的传输,场分布由 Collins 衍射积分给出:

$$E(r, z) = \frac{-ik}{2\pi B} \exp(ikz) \int_0^a \exp\left[\frac{ik}{2B}(Ar_0^2 + Dr^2)\right] \times$$

$$J_0\left(\frac{krr_0}{B}\right) r_0 dr_0 \tag{1}$$

式中:波数 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; J_0 为零阶贝塞尔函数; A, B 和 D 表示光学变换矩阵元素; a 为光阑的半径; z 为通过光阑后的传输距离。

对于一内外半径分别为 ϵa ($0 < \epsilon < 1$, 为遮拦比) 和 a 的环形光阑^[4], (1) 式可改写为

$$E(r, z) = \frac{-ik}{2\pi B} \exp(ikz) \int_{\epsilon a}^a \exp\left[\frac{ik}{2B}(Ar_0^2 + Dr^2)\right] J_0\left(\frac{krr_0}{B}\right) r_0 dr_0 =$$

$$\frac{-ik}{2\pi B} \exp(ikz) \int_0^a \exp\left[\frac{ik}{2B}(Ar_0^2 + Dr^2)\right] J_0\left(\frac{krr_0}{B}\right) r_0 dr_0 -$$

$$\frac{-ik}{2\pi B} \exp(ikz) \int_0^{\epsilon a} \exp\left[\frac{ik}{2B}(Ar_0^2 + Dr^2)\right] J_0\left(\frac{krr_0}{B}\right) r_0 dr_0 \tag{2}$$

将环形光阑窗口函数表达为

$$H = H_1 - H_2$$

$$H_1 = \begin{cases} 1 & r_0 \leq a \\ 0 & r_0 > a \end{cases} \quad H_2 = \begin{cases} 1 & r_0 \leq \epsilon a \\ 0 & r_0 > \epsilon a \end{cases} \tag{3}$$

式中 H_1 和 H_2 为 2 个圆孔窗口函数,且有:

将(3) 式代入(2) 式得

$$E(r, z) = \frac{-ik}{2\pi B} \exp(ikz) \int_0^\infty H_1 \exp\left[\frac{ik}{2B}(Ar_0^2 + Dr^2)\right] J_0\left(\frac{krr_0}{B}\right) r_0 dr_0 -$$

$$\frac{-ik}{2\pi B} \exp(ikz) \int_0^\infty H_2 \exp\left[\frac{ik}{2B}(Ar_0^2 + Dr^2)\right] J_0\left(\frac{krr_0}{B}\right) r_0 dr_0 \tag{4}$$

将(3) 式中的 2 个圆孔窗口函数展开为关于圆心对称、宽度为 $2a$ 、周期为 $4a$ 的矩形脉冲的傅里叶级数与复高斯函数的乘积,则有:

$$H_1 = \left[\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{j=0}^\infty (-1)^j \frac{1}{2j+1} \cos\left(\frac{(2j+1)\pi}{2a} r_0\right) \sum_{n=1}^m F_n \exp\left[-\frac{G_n}{(2.85a)^2} r_0^2\right] \right]$$

$$H_2 = \left[\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{j=0}^\infty (-1)^j \frac{1}{2j+1} \cos\left(\frac{(2j+1)\pi}{2\epsilon a} r_0\right) \sum_{n=1}^m F_n \exp\left[-\frac{G_n}{(2.85\epsilon a)^2} r_0^2\right] \right] \tag{5}$$

式中 F_n 和 G_n 为展开系数和高斯系数,前 10 项所取数值见文献[2]。这里,取 $j = 30$ 进行计算,拟合的圆孔窗口函数和圆环窗口函数如图 1 所示。

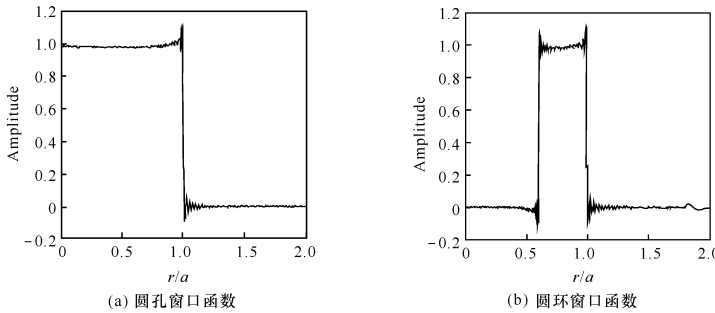


图 1 拟合函数($\epsilon = 0.4$)

Fig. 1 Fitted functions ($\epsilon = 0.4$)

将(5) 式带入(4) 式并整理得:

$$E(r, z) = \frac{-ik}{2\pi B} \exp\left(-\frac{ikD}{2B} r^2\right) \left\{ \sum_{n=1}^{10} \frac{F_n}{2\sqrt{Q_1}} \exp\left(-\frac{k^2 r^2}{4Q_1 B^2}\right) + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{10} \sum_{j=0}^\infty (-1)^j \frac{1}{2j+1} \frac{F_n}{\sqrt{Q_1}} \times \right.$$

$$\left\{ \exp\left[-\frac{(2jB\pi + B\pi + 2akr)^2}{16(G_n B^2/2.85^2 + ika^2 B/2)}\right] + \exp\left[-\frac{(-2jB\pi - B\pi + 2akr)^2}{16(G_n B^2/2.85^2 + ika^2 B/2)}\right] \right\} - \frac{ik}{2\pi B} \exp\left(-\frac{ikD}{2B}r^2\right) \left\{ \sum_{n=1}^{10} \frac{F_n}{2\sqrt{Q_2}} \exp\left(-\frac{k^2 r^2}{4Q_2 B^2}\right) + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{10} \sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j \frac{1}{2j+1} \frac{F_n}{\sqrt{Q_2}} \times \left\{ \exp\left[-\frac{(2jB\pi + B\pi + 2\epsilon akr)^2}{16(G_n B^2/2.85^2 + i\epsilon k a^2 B/2)}\right] + \exp\left[-\frac{(-2jB\pi - B\pi + 2\epsilon akr)^2}{16(G_n B^2/2.85^2 + i\epsilon k a^2 B/2)}\right] \right\} \right\} \quad (6)$$

式中: $Q_1 = G_n/(2.85a)^2 + ikA/2B$; $Q_2 = G_n/(2.85\epsilon a)^2 + ikA/2B$ 。

当然, 从图 1 中可以看出, 由(5)式所表达的函数 H 仍不能完全拟合环形光阑窗口函数, 因此(6)式仍为积分方程(2)式的近似解, 有一定的计算误差, 可通过更好的拟合来提高计算精度。

2 数值计算及分析

以含环形光阑的单透镜光学系统为例, 如图 2 所示, F 为焦点, 所取参数为波长 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, 外半径 $a = 0.001 \text{ m}$, 焦距 $f = 0.2 \text{ m}$ 。

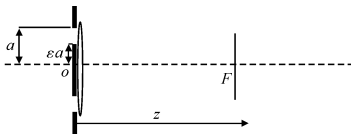


图 2 含环形光阑单透镜光学系统

Fig. 2 Single-lens system with annular diaphragm

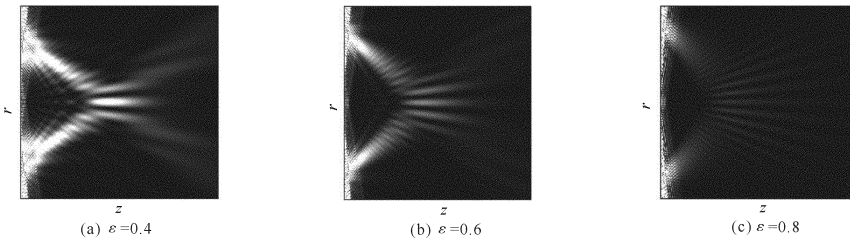


图 3 光束通过含环形光阑的光学系统的传输模拟

Fig. 3 Simulation of beam propagation through system with annular diaphragm

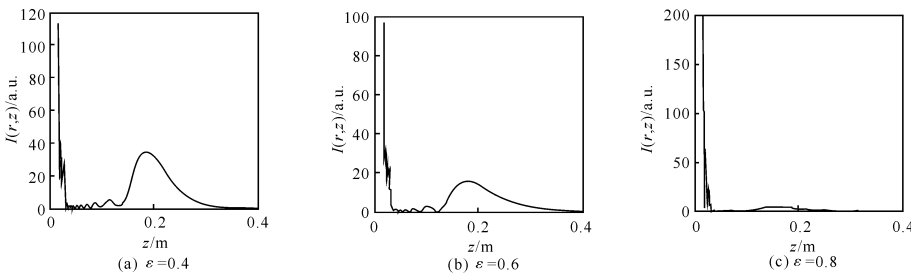


图 4 沿传播方向轴上光强分布

Fig. 4 Intensity distribution on axis along propagation direction

传输过程中的光学矩阵为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-z/f & z \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}$$

在不同遮拦比下, 平面波经过该系统的传输过程如图 3 所示^[5]。

利用(6)式计算了轴上光强分布和焦平面上的光强分布, 结果表明:

1) 如图 4 所示, 轴上光强在靠近透镜时较大, 逐渐远离透镜, 光强迅速减小。但逐渐靠近焦距 ($z = 0.2 \text{ m}$) 时, 又逐渐增大, 出现一个明显的极大值, 这是透镜对光束会聚作用的结果。继续远离透镜, 光强逐渐减小并趋于平缓。可以看出随着遮拦比的增大轴上光强减小的速度越快。

2) 随着遮拦比的增大(即透光部分越窄), 环形光阑的衍射效应变得明显。表现为焦平面上的中心光强值减小, 中心亮斑尺寸减小, 旁瓣光强值增大, 功率(能量)从中心向旁边扩散, 如图 5 所示。

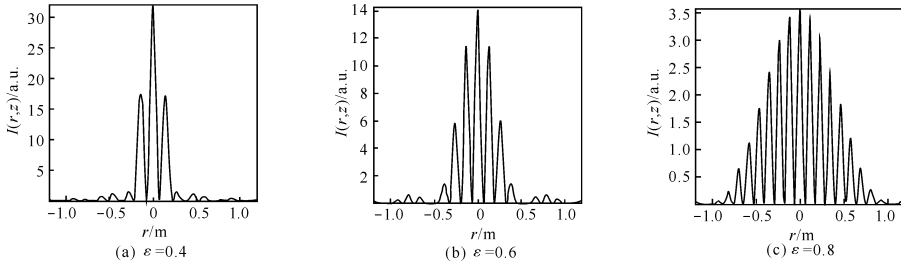


图5 焦平面上的光强分布

Fig. 5 Intensity distribution on focal plane

3 结论

采用将环形光阑的窗口函数展开为傅里叶级数与复高斯函数的乘积的技巧,导出了平面波经过含环形光阑光学系统后光场分布的近似解析表达式,相对直接数值积,节约了机时,便于在微机上进行操作。用该表达式数值模拟了平面波的传输过程,研究了遮拦比的变化对光束传输特性和光强分布的影响,其结果对控制光束和光学系统设计具有一定的指导意义。本文的研究方法可推广用于其他类型的光束经过含光阑光学系统的传输。本文中的计算误差主要是由窗口展开函数仍不能完全准确拟合窗口函数引起的,可以通过更好的拟合来提高计算精度。

参考文献:

[1] 季小玲,刘雅静,吕百达.两种硬边衍射光束计算模拟方法的比较[J].强激光与粒子束,2005,17(6):801-807.
JI Xiao-ling, LIU Ya-jing, Lü Bai-da. Comparison of two numerical simulation methods for hard-edged diffracted beams[J]. High Power Laser and Particle

Beams, 2005,17(6):801-807. (in Chinese)
[2] WEN J J, BREAZEALE M A. A diffraction beam field expressed as the superposition of Gaussian beams [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1988,83(5):1752-1756.
[3] 赵光普,吕百达.光束通过硬边光阑系统变换的改进算法[J].强激光与粒子束,2004,16(6):707-711.
ZHAO Guang-pu, Lü Bai-da. Improved algorithm for beam transformation through hard-aperture optics [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004,16(6):707-711. (in Chinese)
[4] 刘波,吕百达.会聚球面波通过环形光阑的光强分布[J].激光技术,2005,29(1):77-80.
LIU Bo, Lü Bai-da. Intensity distribution of converging spherical waves passing through an annular aperture [J]. Laser Technology, 2005, 29 (1):77-80. (in Chinese)
[5] QU Wei-juan, LIU Li-ren, LIU De-an, et al. Numerical simulation of wave fronts diffracted by apertures with circular symmetry [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2007,118(11):521-526.