

文章编号: 1001-3806(2006)04-0390-02

受光阑限制光束衍射场的高阶修正

刘永欣, 吕百达*

(四川大学 激光物理与化学研究所, 成都 610064)

摘要: 为了模拟受光阑限制光束衍射场的分布, 利用泰勒展开得到了一系列的高阶修正场。随着传输距离 z 的减少, 只需增大到合适的阶数 M 即可模拟衍射场分布。对于不同的传输距离 z , 可根据不等式来选择合适的阶数 M 。以超高斯光束为例, 用数值计算例说明理论公式的应用。所得结果对于研究通过光阑衍射光束的传输是有用的。

关键词: 激光光学; 光阑衍射; 高阶修正; 阶数 M ; 超高斯光束

中图分类号: O435 文献标识码: A

The higher-order revision of the diffraction field of apertured beams

LIU Yongxin, LÜ Bairda

(Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract In order to simulate the diffraction field of apertured beam more precisely, the higher order field can simulate the diffraction field of apertured beam by an appropriate increase of the expansion order M as the propagation distance z decreases. For different values of the propagation distance z , the expansion order M can be chosen according to the inequality proposed. Taking the super-Gaussian beam as an example, numerical calculation is performed to illustrate the application of the theoretical formulations. The results obtained in this paper are useful for studying the propagation of optical beam diffracted by an aperture.

Key words laser optics; diffraction by an aperture; higher order revision; expansion order M ; super-Gaussian beam

引 言

激光光学中, 对光束的传输变换问题已进行了许多研究^[1~6]。在近轴近似下, 光束通过光阑后的衍射场分布在近场和远场可分别由菲涅耳衍射积分和夫朗和费衍射积分表示, 菲涅耳衍射积分对近场和远场都适用, 而夫朗和费衍射积分只适用于远场^[7]。ZAPATA-RODRIGUEZ^[8]研究了近轴光束在近场和远场的变化, 从菲涅耳衍射积分推导出了满足波动方程高阶修正场的积分公式。作者利用由泰勒展开得到的一系列高阶修正场来模拟受光阑限制光束的衍射场分布, 并以超高斯光束^[9, 10]经圆孔硬边光阑衍射为例, 通过高阶修正与菲涅耳衍射积分的比较表明, 随着传输距离 z 的不同, 只需选择合适的阶数 M 即可准确模拟衍射场分布。还给出了选择阶数 M 的不等式。

1 理论分析

在柱坐标系下, 光束通过半径为 a 的圆孔硬边光

阑衍射后的场分布可由菲涅耳衍射积分表示为:

$$u(r, \theta, z) = \frac{1}{-i\lambda z} \exp(-i\frac{\pi}{\lambda z} r^2) \int_0^a \int_0^{2\pi} d\theta_0 u_0(r_0, \theta_0, 0) \times \exp(-i\frac{\pi}{\lambda z} r_0^2) \exp[i\frac{2\pi}{\lambda z} r r_0 \cos(\theta_0 - \theta)] r_0 \quad (1)$$

式中, λ 为波长, z 为观察面与光阑的距离, (r_0, θ_0) , (r, θ) 分别为光阑面和观察面的极坐标, $u_0(r_0, \theta_0, 0)$ 为光阑面场分布。

利用泰勒展开式:

$$\exp(-i\frac{\pi}{\lambda z} r_0^2) = \sum_{m=0}^{\infty} (-i\frac{\pi}{\lambda z} r_0^2)^m / m! \quad (2)$$

将 (2) 式代入 (1) 式得:

$$u_M(r, \theta, z) = \frac{1}{-i\lambda z} \exp(-i\frac{\pi}{\lambda z} r^2) \sum_{m=0}^M \frac{1}{m!} \int_0^a \int_0^{2\pi} d\theta_0 u_0(r_0, \theta_0, 0) (-i\frac{\pi}{\lambda z} r_0^2)^m \times \exp[i\frac{2\pi}{\lambda z} r r_0 \cos(\theta_0 - \theta)] r_0 \quad (3)$$

式中, $M \rightarrow \infty$ 。

若入射光束为旋转对称光束, 可利用积分公式:

$$\int_0^{2\pi} d\theta_0 \exp[i\frac{2\pi}{\lambda z} r r_0 \cos(\theta_0 - \theta)] = 2\pi J_0(\frac{2\pi}{\lambda z} r r_0) \quad (4)$$

将 (3) 式简化为:

$$u_M(r, z) = \frac{2\pi}{-i\lambda z} \exp(-i\frac{\pi}{\lambda z} r^2) \sum_{m=0}^M \frac{1}{m!} \times$$

基金项目: 国家高技术基金资助项目 (A823070)

作者简介: 刘永欣 (1979), 女, 硕士研究生, 从事激光光束传输变换方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: badah@scu.edu.cn

收稿日期: 2005-04-01; 收到修改稿日期: 2005-06-22

$$\int_0^a dr_0 u_0(r_0, 0) \left(-i \frac{\pi}{\lambda z} r_0^2\right)^m J_m\left(\frac{2\pi}{\lambda z} r r_0\right) r_0 \quad (5)$$

式中, $J_n(\cdot)$ 为第一类 n 阶贝塞尔函数。

当传输距离 z 大到足够使 $\frac{\pi}{\lambda z} r_{0\max}^2 \ll 1$, 可令 $M = 0$

于是 (5) 式的零阶修正即为夫朗和费衍射积分:

$$u_0(r, z) = \frac{2\pi}{-i\lambda z} \exp\left(-i \frac{\pi}{\lambda z} r^2\right) \int_0^a dr_0 u_0(r_0, 0) J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda z} r r_0\right) r_0 \quad (6)$$

随着传输距离 z 的减小, 可逐渐增大 M , 大到足够使 $\left(\frac{\pi}{\lambda z} r_{0\max}^2\right)^{M+1} / (M+1)! \ll 1$, (5) 式中, 泰勒展开的第 $M+1$ 项可忽略不计, 实际工作中取:

$$\left(\frac{\pi}{\lambda z} r_{0\max}^2\right)^{M+1} / (M+1)! < 0.02 \quad (7)$$

即可满足要求。此时, 用 (5) 式的 M 阶修正就可准确模拟 z 平面的衍射场分布。

2 数值计算结果和分析

现以超高斯光束为例, 在光阑面处场分布为^[9, 10]:

$$u_0(r_0, 0) = \exp\left[-\left(\frac{r_0}{w_0}\right)^n\right] \quad (8)$$

式中, w_0, n 分别为超高斯光束的束腰宽度和阶数 ($n \geq 2$), $n = 2$ 时为熟知的高斯光束。

将 (8) 式代入 (5) 式, 得超高斯光束通过圆孔光阑衍射后场分布的 M 阶修正为:

$$u_M(r, z) = \frac{2\pi}{-i\lambda z} \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda z} r^2\right] \sum_{m=0}^M \frac{1}{m!} \times \int_0^a dr_0 \exp\left[-\left(\frac{r_0}{w_0}\right)^n\right] \left(-i \frac{\pi}{\lambda z} r_0^2\right)^m J_m\left(\frac{2\pi}{\lambda z} r r_0\right) r_0 \quad (9)$$

式中, 阶数 M 对于不同的 z 可根据不等式 (7) 式来选择。

用 MATHEMATICA 软件进行数值积分计算, 得到超高斯光束 ($\lambda = 1.06 \times 10^{-3} \text{ mm}$, $w_0 = 1 \text{ mm}$, $n = 10$) 通过 $a = 0.5 \text{ mm}$ 圆孔光阑衍射后的光强分布。其中, 图 1 是超高斯光束通过圆孔光阑衍射后在 $z = 50 \text{ mm}$ (见图 1a), $z = 120 \text{ mm}$ (见图 1b), $z = 500 \text{ mm}$ (见图 1c), $z = 2000 \text{ mm}$ (见图 1d) 面上的横向光强分布。“—”为 (1) 式的菲涅耳衍射积分, “...”为 (9) 式的 M 阶修正的计算结果。由图知, 在 (9) 式中, 只要根据传输距离 z 的不同而选择合适的阶数 M , 就能准确模拟该平面上的衍射场分布。图 1a~图 1d 的阶数 M 分别为 41, 18, 5, 2 是根据文中不等式 (7) 式选择的。

图 2 是超高斯光束通过圆孔光阑衍射后在 $z = 120 \text{ mm}$ (见图 2a) 和 $z = 500 \text{ mm}$ (见图 2b) 面上由菲涅耳衍射积分 (1) 式算得的轴上光强 $I(0, z)$ 和由 (9) 式的 M 阶修正算得的轴上光强 $I_M(0, z)$ 的绝对误差 $\delta = |I_M(0, z) - I(0, z)|$ 随阶数 M 的变化。由图知, 当阶

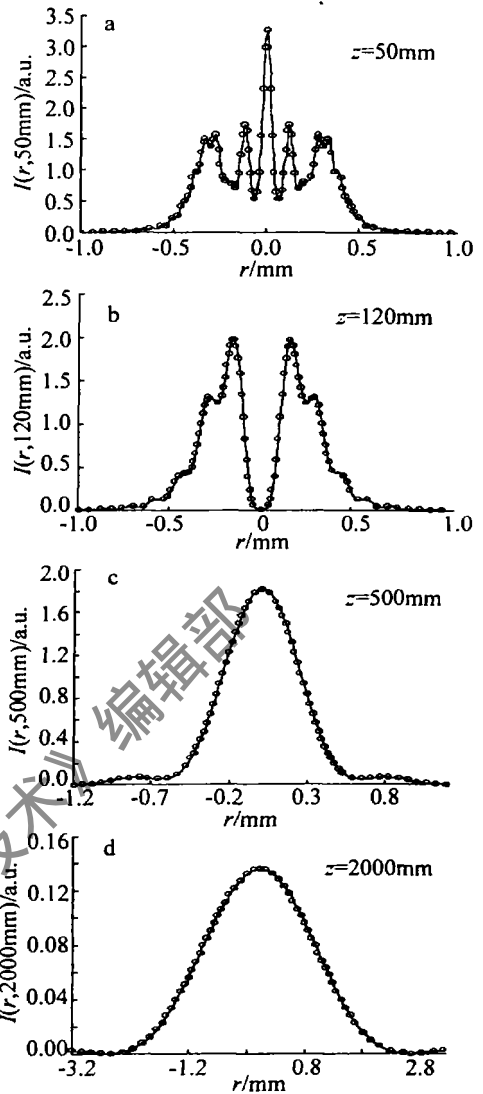


Fig 1 Transverse intensity distributions of a super-Gaussian beam of $n = 10$ diffracted by a circular aperture at planes

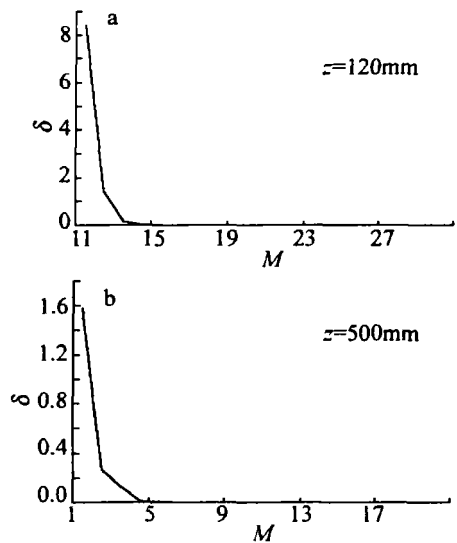


Fig 2 The absolute error δ of the axial intensity versus the expansion order M at planes

数 M 大于某一个值后, 例如图 2a 中 $M > 17$, 图 2b 中 (下转第 401 页)

Table 3 Characteristics of novel demux

center wavelength	IU-100GHz channel 21 to 36
- 0.5dB bandwidth	> 0.3nm
- 25dB bandwidth	< 1.3nm
insertion loss	< 4.0dB
channel uniformity	< 1.0dB
wavelength temperature stability	< 0.002nm/°C
PDL	< 0.20dB
adjacent channel isolation	> 25dB
non-adjacent channel isolation	> 30dB
return loss	> 45dB

光梳状滤波器和 200GHz 介质膜滤波器很容易得到 32 波长或者 40 波长 100GHz 间隔密集波分解复用器; 而采用 50GHz 光梳状滤波器和 100GHz 介质膜滤波器则可得到 32 波长或者 40 波长的 50GHz 间隔密集波分解复用器。这样既有效简化器件的结构和设计, 又改善器件的性能, 同时也降低了对介质膜滤波器的要求, 便于器件在解复用波长数目和间隔上实现升级。

与相同波长数目和解复用间隔的平坦型阵列波导光栅密集波分复用器相比, 该器件的技术指标与前者相当, 而且在非相邻信道隔离度、纯无源器件无须温控等特性上还优于前者^[1]。

3 结 论

采用光梳状滤波器和多层介质膜干涉滤波器技术

(上接第 391 页)

$M > 4$ 就能准确模拟该面上的衍射场分布, 并且阶数 M 都满足不等式 (7) 式。根据泰勒展开式 (2) 式可知, 阶数 M 越大, (2) 式的第 M 项值越小, (9) 式越精确, 但考虑到计算效率, 一般选用能准确模拟衍射场的较小的阶数 M 即可。图 1a~ 图 1d 中阶数选择就是按此进行的。

3 小 结

以超高斯光束经圆孔光阑衍射为例, 通过高阶修正来模拟其衍射场分布, 并与菲涅耳衍射积分做了比较。结果表明, 随着传输距离 z 的不同只需选择合适的阶数 M 即可准确模拟衍射场分布。当传输距离 z 大到足够令 $M = 0$ 时, 即为夫朗和费衍射积分。可根据文中提供的不等式 (7) 式来选择阶数 M , 在此前提下, 高阶修正适用于菲涅耳区和夫朗和费区衍射场的模拟。

参 考 文 献

[1] SIEGMAN A E. Lasers [M]. California University Science Booksmill

制作的 16 波长 /100GHz 间隔新型密集波分复用器具有总的插入损耗低、通道之间的不平坦度小和对介质膜滤波器要求低等优点。利用这种结构很容易实现密集波分解复用器在解复用波长数目和解复用波长间隔上的升级。

参 考 文 献

- [1] XU Y Zh, YANG T T, ZHANG Y. Review on the key optical components in optical transmission network [J]. Telecommunication Science, 2003, 6: 27~32 (in Chinese).
- [2] KE Ch J, LU D M, HUANG D X. Novel architecture of wavelength interleaving filter with Fourier transform-based crystal waveplate [J]. Proc SPIE, 2002, 4652: 526~531.
- [3] CHIBA T, ARAI H, OHIRA K. Novel architecture of wavelength interleaving filter with Fourier transform-based MZIs [J]. OFC, 2001, 3: WB5-1~WB5-3.
- [4] DINGEL B B, ARUGA T. Properties of a novel non-cascaded type easy-to-design, ripple-free optical bandpass filter [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(8): 1461~1469.
- [5] HUANG D W, CHEN T H, LAI Y Ch. A rayed waveguide grating DWDM interleaver [J]. OFC, 2001, 3: WDD80-1~WDD80-3.
- [6] KE Ch J, LU D M, HUANG D X. Optimization of output spectra performance in crystal typed interleaver [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(suppl): 371~374 (in Chinese).
- [7] ZHANG B, HUANG D X, WU L. Improving the filtering characteristics of interleaver [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Nature Science Edition), 2002, 30(8): 12~14 (in Chinese).
- [8] LIU J, SUN J Q, FU Y A. The multi-channel TFF DWDM with low insertion loss [J]. Study on Optical Communications, 2005, 2: 56~58 (in Chinese).
- [9] Valley, 1986: 712~743.
- [2] LÜ B D. Laser optics [M]. Beijing Higher Education Press, 2003: 405~412 (in Chinese).
- [3] TAO X Y, ZHOU N R, LÜ B D. Study on beam propagation properties based on Collins formula in frequency domain and Hankel transform [J]. Laser Technology, 2003, 27(1): 24~28 (in Chinese).
- [4] LÜ B D, JIX L. An approximate analytical study of laser beams with amplitude modulations and phase fluctuations through a multiaper-tured ABCD system [J]. J Optics, 2004, A6(2): 1~6.
- [5] WU J F, WANG Y, ZHANG L. The coupling of Gaussian beam between fibers [J]. Laser Technology, 2004, 28(2): 181~183 (in Chinese).
- [6] JIX L, LÜ B D. Transformation properties of super-Gaussian beams passing through an astigmatic lens [J]. Laser Technology, 2002, 26(1): 9~11 (in Chinese).
- [7] BORN M, WOLF E. Principle of optics [M]. New York: Pergamon Press, 1980: 370~458.
- [8] ZAPATA-RODRIGUEZ C J. Paraxial waves in the far-field region [J]. Optik, 2002, 113(8): 361~365.
- [9] PARENT A, MORN M, LAVIGNE P et al. Propagation of super-Gaussian field distributions [J]. Opt & Quant Electron, 1992, 24(9): 1071~1079.
- [10] LÜ B D, WANG X Q, ZHANG B. Changes of super-Gaussian beams upon propagation [J]. Laser Technology, 1997, 21(4): 206~209 (in Chinese).