

# 环形光束大气传输数值模拟与分析

何武光, 吴 健, 杨春平

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

**摘要:**为了研究大气湍流对环形光束激光工程应用的影响,采用多相位屏数值模拟的方法对环形光束在大气湍流中的传输进行了仿真模拟。通过改变大气湍流强度、传输距离等参数,定量计算了不同传输条件下质心漂移均方根、远场目标的焦平面平均功率密度,给出环形光束传输路径上特征距离解析式并分析了大气湍流对环形光束远场平均光强分布的影响。结果表明,环形光束在大气湍流中传输时光斑质心漂移随湍流效应(湍流强度或传播距离)增强而增大,远场光束质量随遮拦比增大而降低。遮拦比小于0.5时,大气湍流对光束质量的影响较为明显。环形光束大气传输数值模拟方法,可为高能激光武器等激光工程应用的理论分析和效能评估提供依据。

**关键词:**大气湍流;环形光束;数值模拟;光束质量

**中图分类号:**P427.1      **文献标识码:**A

## Numerical simulation and analysis of annular beams propagation through atmospheric turbulence

HE Wu-guang, WU Jian, YANG Chun-ping

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** In order to study the effect of the atmospheric turbulence on the annular laser beams, propagation of annular beams through atmospheric turbulence is simulated using multiple phase screen method. The wandering root mean square (RMS) of beam centroid and mean power density on the far-field target are computed quantitatively for different atmospheric turbulence strengths and propagation distances. With expressions for characteristic distance in the propagation path of annular beam described, influence of atmospheric turbulence on average intensity in far-field is also analyzed. Numerical simulation results show that the beam wander centroid displacement of annular beams increased as turbulent effects increased, and the far-field beam quality was degraded with the increase of obstruction ratio. The atmospheric turbulence can largely reduce the far-field beam quality when obstruction ratio was smaller than 0.5. This method of numerical simulation could be used for analyzing and evaluating the propagation effects in the field of laser engineering such as high energy laser.

**Key words:** atmospheric turbulence; annular beams; numerical simulation; beam quality

### 1 引言

激光在大气中长距离传播时,大气湍流效应使激光辐射在传播过程中随机地改变其波束特性,表现为光强起伏、相位起伏、光束漂移和光束扩展等,严重限制了各种激光工程(如激光通讯、激光雷达、高能激光武器)系统的使用性能,甚至决定了激光

工程系统的技术可行性<sup>[1-2]</sup>。因此,不同类型激光束在湍流大气中的传播规律越来越受人们关注。特别是近年来随着空心光束的广泛应用,不少文献研

作者简介:何武光(1979-),男,博士研究生,现主要从事激光大气传输仿真的研究。E-mail: hewugd@tom.com

收稿日期:2010-08-18;修订日期:2010-11-17

究了空心光束在湍流介质中的传输特性,分析了空心光束大气传输的平均光强和光束扩展情况<sup>[3]</sup>,并给出了光强闪烁和光束漂移的解析结果<sup>[4-5]</sup>。环形光束作为空心光束的一种特例,也存在于多种场合,如非稳腔输出的高能激光、高斯光束通过环形光阑等。其中,文献[6]研究了环形光束大气传输特性,文献[7]研究了湍流对环形光束扩展的影响。

以上文献的研究成果均为解析结果,很好地揭示了环形光束大气传输的基本规律。由于湍流介质本身的复杂性,解析理论的适应范围有限;而数值模拟的研究方法可选择一定条件下的传输参量,并可对模拟结果进行各种统计特征分析,成为激光大气传输研究的一个重要手段,如中科院安徽光机所开发了大气传输模拟程序 CLAP<sup>[8]</sup>。本文采用多相位屏法模拟环形光束在湍流介质中的传输,分析了目标面能量分布和大气湍流对远场平均光强的影响,并给出了环形光束传播路径上特征距离的解析式,可为高能激光武器等激光工程应用提供理论分析和效能评估方法。

## 2 激光大气传输数值模拟方法

### 2.1 光传输方程与多相屏法

有关光通过大气传输的理论都是建立在标量电磁场波动方程基础上的。标准抛物线方程为<sup>[2]</sup>:

$$2ik \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + 2k^2 n_1 u = 0 \quad (1)$$

式中,  $n_1$  为折射率的起伏值。如果折射率起伏引起的相位变化  $S$  足够小,则可以将真空传播和介质相位调制看成是相互独立并同时完成的两个过程。我们可以将连续的随机介质分割为一系列厚度为  $\Delta Z$  的平行薄片,该片引起的相位调制可以归结为一个位于该片中心的无限薄的相位屏。光场经过相位屏调制,然后在自由空间中传播至下一个相位屏的位置,每个传输段内大气对光波的影响仅为改变其相位而不影响其振幅。

根据上面的分析,光波在大气中从  $Z_i$  平面传到  $Z_{i+1} = Z_i + \Delta Z$  平面的解可通过真空传输和相位屏的相位调制得到<sup>[2]</sup>:

$$u(r, z_{i+1}) = \exp \left[ \frac{i}{2k} \int_{z_i}^{z_{i+1}} \nabla_{\perp}^2 dz \right] \exp [iS(r, z_i)] \cdot u(r, z_i) \quad (2)$$

其中,  $S(r, Z_i)$  为随机湍流相位;  $u(r, Z_i)$  为  $Z_i$  处的光场;  $k$  为波数。因此,对大气湍流中的光传输模拟也分为两部分,即真空传输计算和湍流相位屏的构造。

### 2.2 大气湍流相位屏的构造

激光大气传输数值模拟的一个核心问题就是构造符合大气湍流统计规律的相位屏,以正确反映大气折射率的随机起伏。产生相位屏的方法有多种:FFT 谱反演法、Zernike 多项式法、分形相位屏法、协方差 (Covariance) 法等,其中 FFT 谱反演法是较常用的模拟大气湍流相位屏的方法<sup>[9-10]</sup>。

FFT 谱反演法的基本思想是对一个复高斯随机数矩阵  $a(K_x, K_y)$  用大气湍流的折射率起伏谱  $\Phi_{\phi}(K_x, K_y)$  进行滤波,然后通过逆傅里叶变换得到大气扰动的相位  $\phi(x, y)$ 。这一过程的离散形式为 ( $C$  为控制相位屏方差的调节常数,  $K$  为空间波数)<sup>[8]</sup>:

$$\phi(x, y) = C \sum_{K_x} \sum_{K_y} a(K_x, K_y) \sqrt{\Phi_{\phi}(K_x, K_y)} e^{i(K_x x + K_y y)} \quad (3)$$

这种方法简洁、方便,而快速傅里叶变换使得这种方法更加有效。谱反演法的缺点在于由于网格点取样的有限使得相位的低频成分得不到充分的体现。低频补偿的方法有两种:一是首先产生一个很大的相位屏,然后从中心抽取一小部分,这一小部分中包含了低频成分的特征,这样就需要很大的矩形或方形相位屏;另一种方法是次谐波补偿方法,基本思想是在傅里叶低频次谐波重采样的基础上,对 FFT 法模拟的相位屏进行插值拟合,从而改善相位屏的低频统计特性。

## 3 光束模型及数值模拟结果

环形光束模型可用两束束腰宽度不同的平顶光束之差来描述,则在入射面处 ( $z=0$ ) 环形光束的场分布表达式为:

$$u_0(x, y, 0) = u_{01}(x, y, 0) - u_{02}(x, y, 0) \quad (4)$$

其中,  $u_{01}$ 、 $u_{02}$  分别为平顶高斯光束光场,这里采用 Gori 提出的平顶高斯光束模型<sup>[11]</sup>:

$$u_{01}(x, y, 0) = A \exp \left[ -\frac{(N+1)(x^2 + y^2)}{w_{01}^2} \right] \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[ \frac{(N+1)(x^2 + y^2)}{w_{01}^2} \right]^n \quad (5)$$

式中,  $N$ 、 $w_{01}$  分别是平顶高斯光束  $u_{01}$  的阶数和束腰宽度;  $A$  为振幅系数;相应的,  $w_{02}$  对应平顶高斯光束  $u_{02}$  的束腰宽度,且  $w_{01} > w_{02}$ ,则  $w_{01}$ 、 $w_{02}$  分别为环形光束  $u_0$  的外半径和内半径。设  $\varepsilon$  为环形光束的遮拦比,有  $w_{02} = \varepsilon w_{01}$ 。

文中选取环形光束的参数为:激光波长  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ,外半径  $w_{01} = 30 \text{ mm}$ ,遮拦比  $\varepsilon = 0.5$ 。采

用多相位屏法对准直传输的环形光束通过不同条件大气通道进行数值模拟,其中相位屏间距 200 m,相位屏宽度 0.35 m,计算网格  $512 \times 512$ ,折射率起伏谱均选用 Kolmogonov 谱。

图 1 为模拟的源场处环形光束归一化光强分布图,模拟参数为平顶高斯光束阶数  $N = 10$ ,环形光束外径  $w_{01} = 30$  mm,遮拦比  $\varepsilon = 0.5$ 。图 2 为模拟的环形光束在自由空间传输 2 km 后目标面上光强图,从图中可以看出环形光束远场为类高斯分布的实心光束,主要能量集中在中心亮斑上,此时对光斑分析计算所得中心亮斑能量占总能量比为 53%。当  $\varepsilon$  为 0.5 时,硬边光阑环形光束远场衍射中心亮斑能量占总能量比的理论值为 49%,由于我们模拟的环形光束相当于软边光阑衍射,减小了菲涅耳衍射调制,故中心亮斑能量有所增加。图 3 为模拟的环形光束在不同大气湍流强度条件下传输 2 km 后目标面上短曝光光强图。从模拟的实例样本可以看出在弱湍流条件下环形光束远场光斑扩展较小,能量仍集中在中心;随着湍流强度的增加,远场光斑畸变增大,光斑破碎,光束扩展、漂移现象增强,光束质量进一步退化,中心能量分布分散。

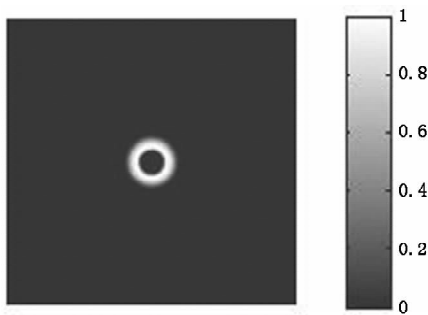


图 1 源场处环形光束的归一化光强分布  
( $N = 10, w_{01} = 60$  mm,  $\varepsilon = 0.5$ )

Fig. 1 initial normalized intensity distribution of annular beam with  $N = 10, w_{01} = 60$  mm and  $\varepsilon = 0.5$

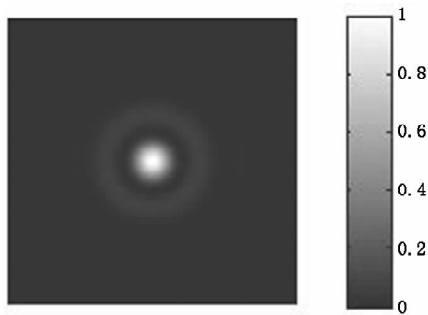


图 2 自由空间传输 2 km 处目标面上光强图

Fig. 2 target intensity patterns over a propagation distance of 2 km in free space

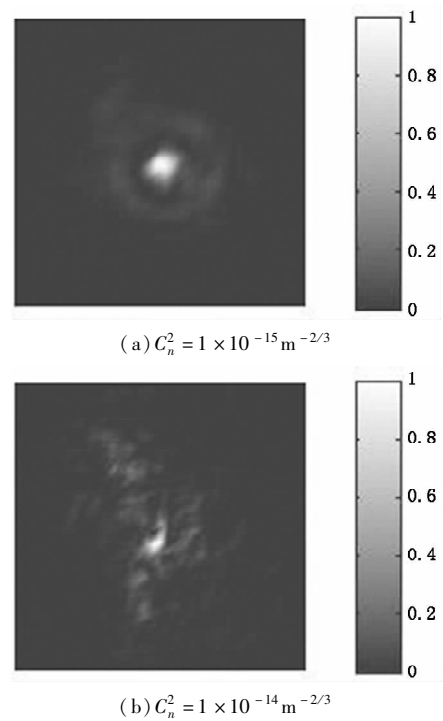


图 3 不同大气湍流强度下传输 2 km 处目标面上光强图

Fig. 3 target intensity patterns over a propagation distance of 2 km for different atmospheric turbulence strengths

#### 4 仿真及分析

##### 4.1 光束漂移

通过对数值模拟得到的环形光束大气传输远场光斑进行多样本统计分析,可以得到天线接收面的光束漂移方差、闪烁方差等,为自由空间光通信等系统性能评估提供依据,其中光束漂移对光电跟踪系统有重要影响。光束漂移主要起因于大尺度涡旋的折射作用,理论和实验研究光束漂移通常以光斑质心位置的变化来描述。图 4 为不同大气湍流强度情况下质心漂移均方根  $\delta_p$  随传播距离  $z$  的变化情形,其中环形光束外径  $w_{01}$  为 30 mm,遮拦比  $\varepsilon$  为 0.5。从图中可以看出,光束漂移均方根随湍流效应(湍流强度或传播距离)增强而增大。

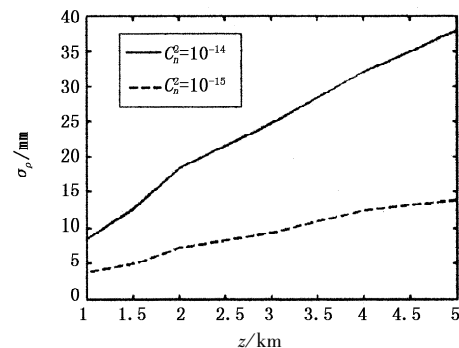


图 4 不同大气湍流强度下质心漂移均方根随传播距离的变化

Fig. 4 wandering rms of beam centroid versus propagation distance for different atmospheric turbulence strengths

4.2 目标面能量分布

对于实际的高能激光系统,往往关心的是远场目标的焦平面平均功率密度和能量集中度,但由于激光大气传输各种效应影响及实际大气的复杂性,难以通过解析关系式获得具体的、定量的结果,而数值模拟仿真可以针对具体系统结构和大气条件给出相应的分析结果。以实际的高能激光系统为例模拟计算焦平面平均功率密度,设激光功率 20000 W,环形光束参数同前所述,水平传输距离  $z = 3 \text{ km}$ ,  $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ,目标直径 50 mm,系统仿真计算取 100 个样本的平均值,并考虑大气散射状况,以轻霾(能见距离 4 km)和晴朗(能见距离 10 km)两种典型天气状况为例,根据文献[1]提供的工程上常用经验公式计算消光系数,对应的大气透过率分别为 0.203 和 0.606。则当能见距离为 4 km 时,目标面上功率密度为  $66.46 \text{ W/cm}^2$ ,当能见距离为 10 km 时,目标面上功率密度为  $224.16 \text{ W/cm}^2$ 。

远场靶面上的能量集中度可直接用光束传输因子 BPF (beam propagation factor) 来定量分析,其定义为<sup>[12]</sup>:

$$\text{BPF} = 1.19P/P_{\text{total}} \quad (6)$$

式中, $P$  定义为远场半径为  $1.22 \lambda z/D$  大小的桶中功率; $z$  为光束传输距离; $P_{\text{total}}$  为输出光束的总功率; $D$  为发射光束直径。图 5 为不同大气湍流强度下远场光束质量随遮拦比的变化曲线,模拟计算参数为:环形光束外径  $w_{01}$  为 30 mm,水平传输距离  $z$  为 3 km。从图中可以看出,环形光束远场光束质量随遮拦比增加而降低,当  $\varepsilon$  小于 0.5 时,大气湍流对光束质量的影响较为明显。

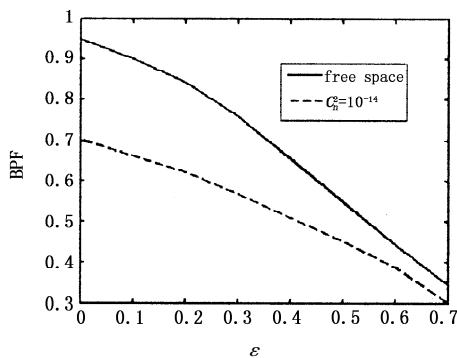


图 5 不同大气湍流强度下远场光束质量随遮拦比的变化

Fig. 5 far-field beam quality of annular beam versus obstruction ratio for different atmospheric turbulence strengths

4.3 特征距离与平均光强

环形光束在自由空间传播过程中,刚开始仍然是环形光斑,光斑中心强度为零,随着传播距离的增

加中心光强越来越强,直至传播到某一特征距离后中心光强随传播距离增加而减弱,但中心亮斑占光斑总能量比保持稳定<sup>[13]</sup>。工程应用中往往需要预测环形光束传播路径上开始出现稳定中心亮斑的位置,但目前还没有能得出确切结果的解析表达式,只能根据环形光束的有效菲涅尔数  $F$  来定性或半定量分析。

参考菲涅尔数的定义,环形光束的有效菲涅尔数  $F$  可表示为:

$$F = \frac{a^2(1-\varepsilon^2)}{\lambda z} \quad (7)$$

式中, $a$  为环形光束外径; $z$  为传播距离。理论上一般把  $F \approx 1$  的区域归为菲涅尔近场衍射区, $F \ll 1$  的区域归为夫琅和费远场衍射区,而当  $F \gg 1$  时对应几何光学区(中心强度为零)。由于中心强度振荡区的存在,根据式(7)难以给出传播路径上开始出现稳定中心亮斑的准确位置,而数值模拟可以得到传播路径上任意位置的光斑状况,从而对解析结果进行修正。对不同外径及遮拦比的环形光束传输进行数值模拟,确定传播过程中中心光强达最大值时的特征距离,即可判断开始出现稳定中心亮斑时对应的  $z_f$  值,根据式(7)并结合数值模拟分析得出环形光束传播路径上特征距离的解析式:

$$z_f = \frac{a^2(1-\varepsilon^2)}{\lambda} \quad (8)$$

当传播距离大于特征距离时,环形光束大气传播平均光强为类高斯分布。图 6 为模拟的不同大气湍流强度下远场横向归一化平均光强分布,其中环形光束外径  $w_{01}$  为 30 mm,遮拦比  $\varepsilon$  为 0.5,传播距离  $z$  为 2 km。从图中可以看出,随着大气湍流强度增加,平均光强的中心峰值减小,光束扩散增大,光斑旁瓣被平滑掉。

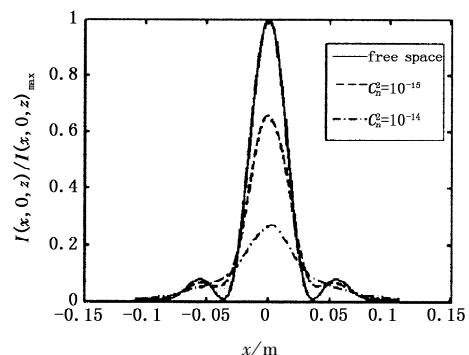


图 6 不同大气湍流强度下远场横向归一化平均光强分布

Fig. 6 cross line of the normalized average intensity in far-field for different atmospheric turbulence strengths

## 5 结 论

用数值模拟的方法仿真模拟环形光束在大气湍流中的传输,通过改变大气湍流强度、传输距离、遮拦比等参数,定量计算了不同传输条件下质心漂移均方根、远场目标的能量分布,并结合数值模拟推导了环形光束传输路径上的特征距离,即传播路径上中心光强达最大值时的距离,分析了大气湍流对环形光束远场平均光强分布的影响。结果表明,环形光束在大气湍流中传输时质心漂移均方根随湍流效应(湍流强度或传播距离)增强而增大,远场光束质量随遮拦比增加而降低。当环形光束在自由空间传播至特征距离时,中心光强达最大值,继续传播中心光强减小但中心亮斑能量比趋稳定。随着大气湍流强度的增加,环形光束远场平均光强中心峰值减小,光束扩散增加,形成类高斯分布。通过环形光束大气传输模拟仿真,对高能激光武器等激光工程应用进行理论分析和效能评估,有一定的实际意义。

## 参考文献:

- [1] Wu Jian, Yang Chungping, Liu Jianbing. The theory of light propagation in the atmosphere [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005. (in Chinese)  
吴健, 杨春平, 刘健斌. 大气中的光传输理论 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005.
- [2] Rao Ruizhong. Light propagation in the turbulent atmosphere [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2005. (in Chinese)  
饶瑞中. 光在湍流大气中的传播 [M]. 合肥: 安徽科技出版社, 2005.
- [3] Cai Yangjian, He Sailing. Propagation of various dark hollow beams in a turbulent atmosphere [J]. Opt Express, 2006, 14(4): 1353 - 1367.
- [4] Y Chen, Y Cai, H T Eyyuboğlu, et al. Scintillation properties of dark hollow beams in a weak turbulent atmosphere [J]. Appl Phys. B, 2008, 90(1): 97 - 92.
- [5] H T Eyyuboğlu, C Z Cil. Beam wander of dark hollow, flat-topped and annular beams [J]. Appl Phys. B, 2008, 93(2): 595 - 604.
- [6] L C Andrews, R L Phillips. Laser beam propagation through random media, 2nd edn [M]. Bellingham: SPIE Press, 2005: 720 - 729.
- [7] Chen Xiaowen, Ji Xiaoling. Influence of turbulence on the spreading of annular beams [J]. Acta Phys. Sinica, 2009, 58(4): 2435 - 2443. (in Chinese)  
陈晓文, 季小玲. 湍流对环状光束扩展的影响 [J]. 物理学报, 2009, 58(4): 2435 - 2443.
- [8] Zhu Wenyue, Huang Yinbo, Qian Xianmei, et al. Code for laser atmospheric propagation and its applications [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(6): 451 - 458. (in Chinese)  
朱文越, 黄印博, 钱仙妹, 等. 激光大气传输模拟程序 CLAP 及其应用 [J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 451 - 458.
- [9] J M Martin, S M Flatté. Intensity images and statistics from numerical simulation of wave propagation in 3-D random media [J]. Appl Opt, 1988, 27(11): 2111 - 2126.
- [10] Zhang Huimin, Li Xinyang. Numerical simulation of wavefront phase screen distorted by atmospheric turbulence [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(1): 14 - 19. (in Chinese)  
张慧敏, 李新阳. 大气湍流畸变相位屏的数值模拟方法研究 [J]. 光电工程, 2006, 33(1): 14 - 19.
- [11] F Gori. Flattened Gaussian beams [J]. Opt Commun, 1994, 107: 335 - 341.
- [12] Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun. Study on universal standard for evaluating high energy beam quality [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(4): 773 - 778. (in Chinese)  
刘泽金, 周朴, 许晓军. 高能激光光束质量通用评价标准的探讨 [J]. 中国激光, 2009, 36(4): 773 - 778.
- [13] Zhang Yongli, Pan Liuzhan. Propagation properties of Bessel beams through a hard-edged annular apertured ABCD optical system [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(2): 204 - 206. (in Chinese)  
张永利, 潘留占. 贝塞尔光束通过环形硬边光阑的 ABCD 光学系统传输 [J]. 激光与红外, 2009, 39(2): 204 - 206.