

## 湍流大气中聚焦高斯光束焦移的数值模拟分析

钱仙妹, 朱文越, 饶瑞中

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学研究室, 安徽 合肥 230031)

**摘 要:** 湍流大气不仅使在其中传输的聚焦高斯光束的束腰处光斑发生扩展, 也使光束的束腰位置发生移动。采用不均匀分布相屏的傅立叶变换法数值模拟了湍流对聚焦高斯光束束腰位置的影响, 发现在湍流大气中传输的聚焦光束不再聚焦在真空传输的焦点处, 焦点的移动与湍流强度和初始光束半径有关。数值模拟结果表明: 聚焦高斯束在均匀湍流强度的水平路径传输上传输时, 湍流将导致光束的焦点向发射点移动, 而且焦移的幅度随着湍流强度的增大而增大; 在同等强度湍流大气中传输的聚焦高斯光束, 其焦点前移的幅度将随着光束半径的增大而减小。

**关键词:** 大气光学; 光传播; 大气湍流; 数值模拟; 聚焦高斯光束; 焦移

中图分类号: TN012; P407

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2006)02-0085-04

## Simulation of the Focal Shift of a Focused Gaussian-beam Propagating in Turbulent Atmosphere

QIAN Xian-mei, ZHU Wen-yue, RAO Rui-zhong

(Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The beam waist of a convergent Gaussian beam propagating through turbulent atmosphere moves as well as beam spreading. By using nonuniform split-phase screen and FFT algorithm, the effects of turbulence on the location of beam waist of a convergent Gaussian beam are simulated. The simulated results show that the beam waist does not locate at its vacuum position but moves toward the transmitter as turbulence strength increases and initial beam radius decreases.

**Key words:** atmospheric optics; laser propagation; atmospheric turbulence; numerical simulation; focused Gaussian beam; focal shift

### 1 引 言

激光经湍流大气传输时, 由于折射率的随机起伏使得光束波前产生倾斜, 从而导致光斑的破碎、光强闪烁和光斑扩展<sup>[1,2]</sup>。对于聚焦光束的传输, 湍流

不仅使其焦点处光斑发生扩展<sup>[3]</sup>, 还会对其实际的聚焦位置有一定的影响。根据 Richardson 描绘的湍流级串图像, 湍流是由不同尺度的湍涡组成; 借助湍涡的随机透镜假设<sup>[4]</sup>, 由于每个湍涡内外折射率

收稿日期: 2006-05-24; 修改日期: 2006-07-25

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

E-mail: qxm19822008@eyou.com

的起伏变化,因此可以把湍流中的一个湍涡当作一个随机透镜。各种尺度的湍涡透镜构成了一组复杂的光学系统,它对在湍流介质中传播的光波进行调制,起到聚焦或散焦作用,使得聚焦光束不再聚焦在真空中的焦点处,而可能在其前后移动。我们在进行聚焦光束大气传输的实验时,也发现在真空焦点处往往不能获得最小的光斑,其实际的位置可能位于真空焦点前后一段距离内, Andrews<sup>[5,6]</sup>也曾从有效光束参数出发理论分析了聚焦高斯光束的束腰半径和位置问题,并预言了束腰位置的移动。因此,为了在目标观察面上获得最大的功率密度,需要知道激光束实际的聚焦位置。

本文基于多层相位屏傅立叶变换的数值模拟方法<sup>[4,7-9]</sup>,以聚焦高斯光束为例,又考虑到传输路径上光斑越来越小,采用了根据焦点半径大小而网格尺寸作线性收缩的坐标变换法<sup>[10]</sup>,在光束真空焦点前后设置不均匀相屏,通过数值模拟得到各个相位屏上的光束半径大小,以准确找到湍流大气中光束实际的聚焦点位置,得出在湍流大气中传输的聚焦高斯光束实际聚焦位置的一般性规律。

## 2 数值模拟方法

随机介质中光传播的数值模拟都是从光传播的麦克斯韦波动方程出发,具体到湍流大气中的光传播,忽略偏振特性,只考虑前向小角散射而忽略后向散射,经过傍轴近似可以得到抛物型方程

$$2ik \frac{\partial \Psi}{\partial z} + \nabla_{\perp}^2 \Psi + 2k^2 n \Psi = 0, \quad (1)$$

式中:  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  为波数;  $\Psi$  为所求得的光场;  $\nabla_{\perp}^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  为拉普拉斯算符;  $n$  为折射率起伏。方程(1)是随机介质中光传播数值模拟的出发点。

为了得到光场  $\Psi$ ,常用的数值模拟方法是多层相位屏傅立叶变换法。对于聚焦光束的大气传输,为了充分采样光场,准确找到光束的实际聚焦点位置,采用了线性坐标变换法<sup>[10]</sup>,并在真空焦点前后设置稠密的相位屏,而在离真空焦点远的地方设置的相位屏相对较疏。计算各个相屏上光束半径的大小,并认为光束半径最小的相屏所在位置是聚焦光束的实际焦点位置。考虑到数值模拟过程中相屏

间距的选取要能反映出湍流介质特性,相屏的间距不能过大或过小,于是在焦点附近的相屏间距最小选择 30 m 左右,焦点远处的相屏间隔一般选择 60 m 左右或更大。

## 3 数值模拟结果与分析

以聚焦高斯光束在湍流大气中传输为例,选择 Kolmogorov 湍流谱型,激光波长  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 。分别改变湍流强度和初始半径,分析它们各自对聚焦光束焦点位置的影响。

首先考虑湍流强度对聚焦光束焦移的影响。选择光束的初始半径为  $W_0 = 60 \text{ mm}$ , 初始曲率半径为  $R_0 = 3 \text{ km}$ , 分别对湍流强度为  $C_n^2 = 1 \times 10^{-16}$ ,  $1 \times 10^{-15}$ ,  $5 \times 10^{-15}$ ,  $1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ (对应的 Rytov 指数分别为  $\beta_0^2 = 0.0423, 0.423, 0.846, 4.23$ ) 进行数值模拟,光束半径随传输距离的变化关系如图 1 所示。

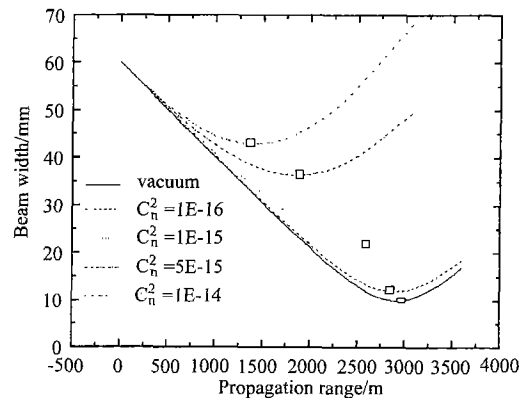


图 1 不同湍流强度时光束半径随传输距离的变化关系

Fig.1 Simulated beam width as a function of propagation range with different  $C_n^2$

在图 1 中,不同湍流强度下光束的聚焦位置都用方框或圆圈标记出来,其中真空传输的焦点位置  $z_f = 2917 \text{ m}$ 。可以看到,光束经过湍流大气传输后不再聚焦在  $z_f$  处,实际的焦点向发射点移动,也即焦点发生前移,随着湍流强度的增大,实际的焦点位置分别为:  $z'_f = 2884, 2586, 1865, 1400 \text{ m}$ ,可见前移的幅度随着湍流强度的增大而增大。值得注意的是,从图 1 可以很明显地看到,随着湍流的增强,实际焦点的前移幅度也跟着增大,但是焦点附近的光束半径变化平缓,光束的准直性提高。若把在焦点附近光束半径变化为焦点半径的 10% 的

传输距离变化的动态范围称作为焦深, 图 2 给出的是焦点附近焦深距离内光束半径的变化情况。

图 2 显示, 在焦点附近的一段传输距离内光束半径变化很小。对上面给出的四种湍流强度情况, 随着湍流强度的增大各自的焦深分别为 537 m、925 m、1238 m 和 1241 m, 可见随着湍流强度的

增大焦深也相应增大。所以, 对于较强湍流情况, 由于焦点处光束具有很高的准直性, 焦点附近很长一段传输距离内光束半径的变化很小, 在这一段传输距离内放置目标观察面都可以获得较强的功率密度。

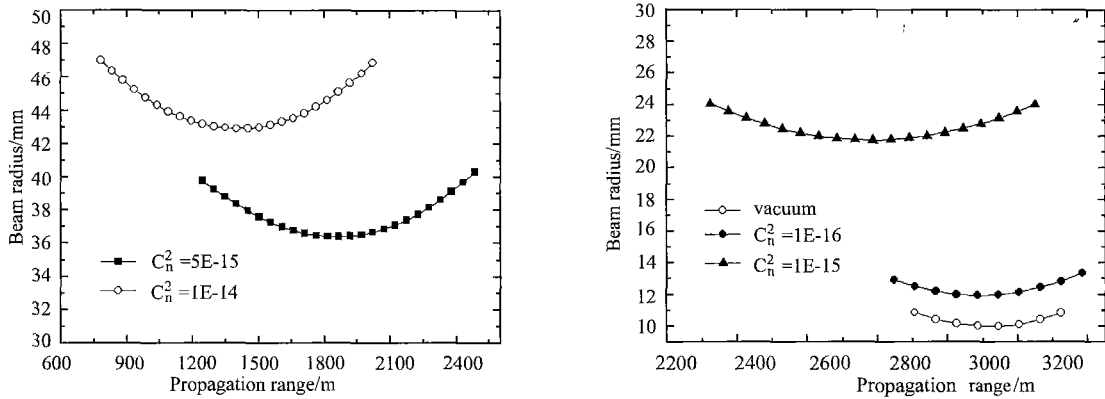


图 2 焦点附近焦深内光束半径的变化

Fig.2 The change of beam radius in the focal depth

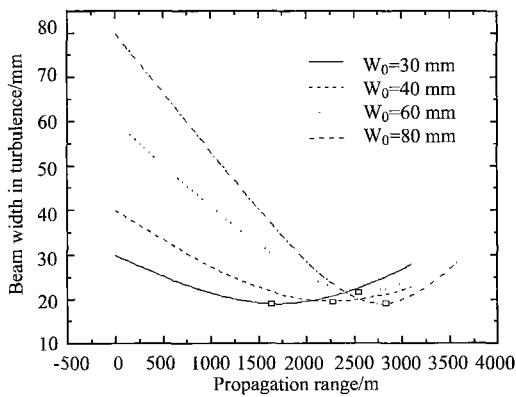


图 3 不同初始光束斑半径时光束半径随传输距离的变化关系

Fig.3 Simulated beam width as a function of propagation range with different

聚焦光束的焦移不仅与湍流强度有关, 还与初始光束半径有关。选择初始光束曲率半径仍为  $R_0 = 3 \text{ km}$ , 湍流强度  $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ , 分别对初始光束半径 30 mm, 40 mm, 60 mm 和 80 mm 的聚焦光束传输进行数值模拟, 得到的光束半径与传输距离的变化关系如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 湍流大气中聚焦光束的焦

移与初始光束半径有关。对于上面的四种初始光束半径的聚焦光束, 随着初始光束半径的增大, 通过模拟计算得到它们的聚焦点位置分别为 1665 m、2293 m、2586 m 和 2765 m。可见焦移幅度随着初始光束半径的减小而增大, 随光束半径的增大而减小。

从图 1 和图 3 可以得出结论, 湍流大气对于在其中传输的聚焦光束来说相当于一个复杂的负透镜系统, 它使聚焦高斯光束不再聚焦在真空的焦点处, 实际的位置向发射点方向移动, 也即焦点发生前移, 而且前移的幅度随着湍流强度的增大而增大, 随着初始光束半径的增大而减小。另外, 由于数值模拟对相屏间隔的最小距离有一定的限制, 于是没有办法做到正好在光束焦点位置放置一个相屏, 所以通过数值模拟计算给出的只是焦点的大致位置; 但在焦点附近相邻两相屏间的光束半径的变化很小, 其对近似获得光束实际焦点位置的影响不大。

#### 4 讨论

聚焦激光束在湍流大气中传输时, 由于大气折

射率的随机起伏扰动使光束的聚焦点不再位于真空焦点处,这种湍流效应在激光工程应用中是必须要考虑到的。为了在目标观察面上获得最大的功率密度,务必要明确湍流大气中聚焦光束的实际聚焦点位置。

本文在多层相屏傅立叶变化法的基础上,在真空焦点附近设置密集相屏,利用数值模拟的手段得到光束实际聚焦点位置,反映湍流大气中聚焦光束传输特性。数值模拟结果显示,湍流对在其中传输的聚焦高斯光束相当于一个复杂的负透镜光学系统,它使聚焦光束的焦点不再位于真空焦点处,焦点发生前移,而且前移的幅度随着湍流强度的增大而增大,随初始光束半径的增大而减小。为此,在聚焦光束大气传输的实际应用中,为了在目标面上获得最大的光强,应根据光束的初始半径和湍流强度适当调整目标位置或传输距离。

#### 参考文献:

- [1] Smith F G. *Atmospheric Propagation of Radiation*[M]. Bellingham, Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1993, 190~201.
- [2] Strohbehn J W, Clifford S F, Ishimaru A, et al. *Laser Beam Propagation in the Atmosphere*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978, 154~155.
- [3] Khmelevtsov S S. Propagation of laser radiation in a turbulent atmosphere[J]. *Applied Optics*, 1973, **12**(10): 2421~2433.
- [4] Rao Ruizhong. *Light Propagation in the Turbulent Atmosphere*[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Publishing company, 2005, 5~21(in Chinese).  
饶瑞中. 光在湍流大气中的传播 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005. 5~21.
- [5] Ricklin J C, Miller W B, Andrews L C. Effective beam parameters and the turbulent beam waist for convergent Gaussian beams[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(30): 7059~7065.
- [6] Ricklin J C, Miller W B, Andrews L C. Optical turbulence effects on focused laser beams: new results[C]// *SPIE*, 1994, 2312: 145~154.
- [7] Martin J M, Flatte S M. Intensity images and statistics from numerical simulation of wave propagation in 3-D random media[J]. *Applied Optics*, 1988, **27**(11): 2111~2126.
- [8] Rubio J A, Belmonte A, Comeron A. Numerical simulation of long -path spherical wave propagation in three-dimensional random media[J]. *Optical Engineering*, **38**(9): 1462~1469.
- [9] Belmonte A. Feasibility study for the simulation of beam propagation: consideration of coherent lidar performance[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(30): 5426~5445.
- [10] Zhang Feizhou. Non-adaptive transformation to calculate the propagation of the focused laser beams[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2003, **20**(6): 656~660 (in Chinese).  
张飞舟. 计算聚焦激光束传输的非自适应坐标变换 [J]. 量子电子学报, 2003, **20**(6): 656~660.

作者简介: 钱仙妹 (1982-), 女, 博士研究生, 主要从事激光大气传输的数值模拟计算研究工作。