

## 激光大气传输湍流扰动仿真技术

李波<sup>1\*</sup>, 王挺峰<sup>2</sup>, 王弟男<sup>2</sup>, 田玉珍<sup>2,3</sup>, 安雪晶<sup>4</sup>

(1. 海军驻长春地区航空军事代表室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 4. 辽宁机电职业技术学院 信息工程系, 辽宁 丹东 118009)

**摘要:** 为了研究激光大气传输时湍流效应对激光应用技术的影响, 对湍流扰动的仿真进行了分析。介绍了在实验室内进行激光大气传输湍流扰动研究的数值仿真技术和仿真系统。阐述了快速傅里叶变换(FFT)和Zernike多项式两种湍流扰动数值仿真方法, 并且对比了两种方法的优劣。利用物理相位屏搭建了实物湍流仿真系统, 介绍了其理论模型并进行了仿真实验, 对激光经湍流系统传输后的光强能量分布进行了研究分析。结果显示, 室内湍流仿真系统能够准确地模拟弱起伏条件下湍流对激光传输的影响。

**关键词:** 激光传输; 湍流扰动; 随机相位仿真; 随机相位屏

**中图分类号:** TN241; TP391.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20120503.0289

## Simulation of laser beam propagation through turbulence

LI Bo<sup>1\*</sup>, WANG Ting-feng<sup>2</sup>, WANG Di-nan<sup>2</sup>, TIAN Yu-zhen<sup>2,3</sup>, AN Xue-jing<sup>4</sup>

(1. Aviation Commissary of Navy in Changchun, Changchun 130033, China;

2. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

4. Department of Information Engineering, Liaoning Jidian Polytechnic Institute, Dandong 118009, China)

\* Corresponding author, E-mail: li86@sina.com

**Abstract:** To investigate the influence of turbulence on the laser propagation through atmosphere, the simulation technology of the turbulence was analyzed. The numerical simulation technology for the turbulence on laser propagation in laboratory was introduced and turbulence simulation systems were also discussed. A detailed description and the comparison for Fast Fourier Transform(FFT) and Zernike polynomial methods of numerical

收稿日期: 2012-04-21; 修订日期: 2012-06-23

基金项目: 中科院三期创新工程资助项目(No. 098Y32C100)

simulation were offered and a turbulence simulation system was established by a static phase screen. The theoretical model and the simulation experiment were also performed, then energy intensity distribution of laser propagating in the turbulence simulation system were studied. The results show that the system can simulate the weak fluctuation turbulence accurately.

**Key words:** laser beam propagation; turbulence; phase simulation; phase screen

## 1 引言

近十几年来,激光通信技术,激光主动照明成像技术以及自适应光学技术的发展促进了学者对激光大气传输研究的更多关注。在激光大气传输过程中,大气温度和气压的随机起伏通常会导致大气折射率的随机起伏,最终使激光在传输过程中产生波前畸变,即湍流效应,这极大地影响了相关应用系统性能发挥,如通信误码率增加,成像系统分辨率远小于衍射极限等。大气湍流效应对于应用技术的影响形式<sup>[1]</sup>,主要有光强闪烁、光束漂移、相位起伏以及光束扩展等。为了提高应用技术的性能及其可靠性,利用这些影响因素评估通信系统,对于系统的设计优化有着重要意义。

对于光波在大气中传输的研究,最为经典也最有影响的是 Tatarskii 关于湍流大气中波的传输理论<sup>[2]</sup>,随后的研究工作很多都是建立在他的研究基础上。Larry C. Andrews 等人<sup>[3]</sup>对激光在大气中的传输进行了系统深入的研究,分析了激光在弱起伏湍流和强起伏湍流两种不同大气条件下传输时,不同功率谱模型得到的不同统计特性,建立了易于分析的数学模型,在理论上对激光大气应用技术起到了重要作用,但是他们的研究仍缺乏必要的实验支持,尚未应用于实际工作系统中。对于系统的测试评估,理想情况是将激光通信系统或成像系统置于外场环境进行实验,测量在一定大气环境下的性能指标,但是湍流大气的随机性导致实验条件的重复性和可操作性都非常低,而且花费巨大,所以通常情况下只有在研究最后阶段,准备十分充分的情况下才进行外场实验<sup>[4]</sup>。因此,研究前期在实验室内进行模拟仿真实验,评估系统性能显得尤为重要。目前常用的模拟仿真实验方法有两种,一是利用数值随机相位屏仿真湍流大气进行仿真实验<sup>[5]</sup>;二是利用物

理随机相位屏搭建内场湍流模拟系统进行实验。本文介绍了利用这两种方法生成随机相位的过程,对比了两种方法的优劣,并利用物理相位屏搭建了实物湍流仿真系统。

## 2 湍流仿真技术

### 2.1 数值仿真

数值仿真是最早也是最全面的一种在实验室内研究激光经湍流传输的方法。利用数值方法生成随机相位屏模拟湍流大气,目的是产生随机相位起伏  $\Delta\phi$ 。目前有两类比较经典的方法,一是频率域间接模拟,这种方法根据大气湍流的功率谱密度函数得到相位空间随机场,然后进行 Fourier 变换得到二维随机相位的空间分布,通常也称为快速傅里叶变换(FFT)法;二是空间域直接仿真,利用一组正交完备基函数随机线性组合表示随机相位组成,常用正交完备基函数为 Zernike 多项式,所以也常叫 Zernike 多项式法。

利用 Fourier 变换法生成满足 Kolmogorov 谱的标准随机相位屏,其核心思想<sup>[6]</sup>就是利用随机相位  $\Delta\phi$  是广义平稳过程的特性,其功率谱密度  $F_w(\kappa)$  与其频谱  $\Psi(\kappa)$  之间存在对应关系:

$$\begin{aligned} \langle \Psi(\kappa) \Psi^*(\kappa') \rangle &= \delta(\kappa - \kappa') F_w(\kappa) \\ \langle \Psi(\kappa') \rangle &= \sqrt{F_w(\kappa')}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $\Psi(\kappa)$  是随机相位  $\Delta\phi$  的频谱,  $F_w(\kappa)$  是其功率谱密度。而大气折射起伏率功率谱密度  $\Phi(\kappa)$  又与随机相位功率谱密度存在对应关系:

$$F_{\Delta\phi}(\kappa_{\perp}) = 2\pi k^2 \Phi_n^0(\kappa_{\perp}, \kappa_z = 0) \times \int_{z_0}^{z_0+\Delta z} C_n^2(\xi) d\xi, \quad (2)$$

其中  $C_n^2$  是大气折射率结构常数。由此可以得出随机相位与大气折射率起伏功率谱密度之间存在 Fourier 变换关系,即可以利用 FFT 方法由折射率起伏功率谱反演出随机相位起伏  $\Delta\phi$ :

$$\Delta\phi(r) = \iint_0^\infty d\kappa_\perp g(\kappa_\perp) \times \sqrt{0.490r_0^{-5/3} \kappa_\perp^{-11/3} / q} e^{i\kappa_\perp \cdot r} = F^{-1} [g(\kappa_\perp) \times \sqrt{0.490r_0^{-5/3} \kappa_\perp^{-11/3} / q}] \quad (3)$$

其中  $g(\kappa)$  为高斯白噪声,  $F^{-1}$  为 Fourier 逆变换。图 1 所示即为利用 FFT 方法得到的标准随机相位屏。

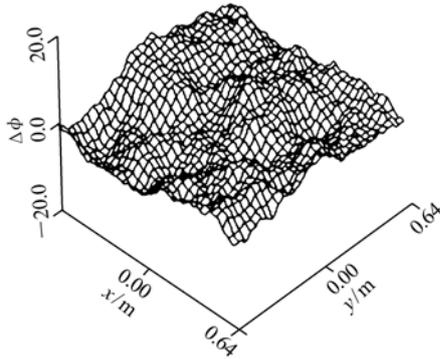


图 1 FFT 相位屏

Fig. 1 FFT phase screen

Zernike 多项式法的核心思想<sup>[7]</sup>是将大气随机相位起伏分解为圆域内正交的 Zernike 多项式的形式,通过确定多项式的线性组合系数来得到随机相位起伏  $\Delta\phi$ :

$$\phi(r) = \sum_{j=1}^\infty a_j \cdot z_j(r) \quad (4)$$

其中  $z_j(r)$  为 Zernike 多项式,  $a_j$  为第  $j$  项 Zernike 多项式系数。Zernike 多项式法的关键是能够得到多项式系数  $a_j$ 。因为存在幅度因子的选择不同和模式序号的不同排列方式,圆域 Zernike 多项式的解析形式不唯一。根据定义,圆域 Zernike 可以表示为径向多项式  $R(r)$  和角向多项式  $\Theta(\theta)$  的乘积:

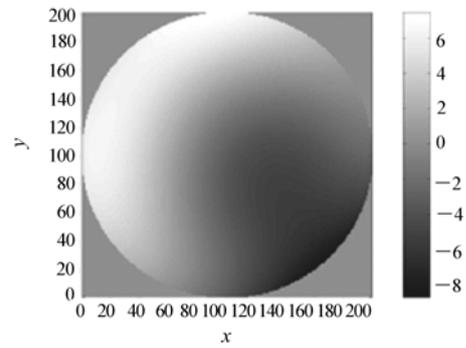
$$Z_j(r, \theta) = R_n^m(r) \Theta_n^m(\theta) \quad (5)$$

且 Zernike 多项式具有正交性:

$$\int_0^1 \int_0^{2\pi} Z_j(r, \theta) Z_k(r, \theta) d^2r = \delta_{jk} \quad (6)$$

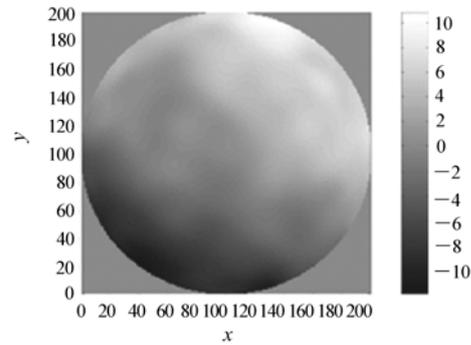
利用 Karhune-loeve 函数(简称 K-L 函数)和随机系数协方差:  $\langle a_i^* a_j \rangle$ , 最终可以求得由 Zernike 多项式组成的随机相位屏,如图 2 所示。

通过对比两种随机相位生成方法及图 1 和



(a) 14项多项式组成

(a) 14-order Zernike polynomials



(b) 230项多项式组成

(b) 230-order Zernike polynomials

图 2 Zernike 多项式随机相位屏

Fig. 2 Zernike phase screen

图 2,可以看出利用 FFT 方法生成的相位屏由于采样原因而缺失低频信息,对湍流引起的低频像差表现不足,如倾斜离焦等。而基于 Zernike 多项式法与 FFT 方法相反,主要问题是对高频成分表现不足。目前, B. J. Herman<sup>[6]</sup>和 M. Carbillat 等<sup>[8]</sup>给出了解决上述问题的方案。

### 2.2 室内仿真系统

数值分析能够非常简单地完成仿真实验,具有良好的重复性、可操作性和低成本的优点。相对于外场实验,利用湍流仿真器搭建内场湍流仿真系统,具有同样的优点,而且能够实时观察湍流效应,具有其他方法难以实现的特点。

搭建内场仿真系统要求湍流发生器能够产生与大气湍流造成的波像差具有相似的时间和空间特性,而且最好是时间和空间量都是独立可控的。湍流发生器的制作方法<sup>[9-10]</sup>最初是利用强迫加热的空气或液体运动法来实现的。加热空气与大气运动过程相似,但是要求很长的传输路径或者产

生几度的温度梯度,所以对于有限空间或者易受干扰的加热源,此方法就不太合适;加热的液体可控性不强而且容易泄漏,不能产生合适的大气环境。除此以外还有其它方法:如空间光调制晶体以及变形镜等,其集成度高,变形精度高,但是此类设备太过复杂且很昂贵,而且其分辨率会受到设备激励源密度的限制。因此,最实用的湍流生成方法是利用静态相位屏。目前,有很多静态相位屏制作技术,比如二元衍射光学,模压塑料光学,计算全息以及近折射率匹配技术<sup>[9-10]</sup>。利用光学聚合物加丙烯酸塑料的近折射率匹配技术制造的静态物理相位屏与传统的物理相位屏相比具有诸多优点,其制造成本低,可重复性、可控性强,且可以适用不同波长<sup>[9]</sup>。静态相位屏由光学玻璃,丙烯酸塑料,以及独特的具有稳定机械结构的近折射率匹配聚合物平板组成,图3所示为随机相位屏结构及俯视图。

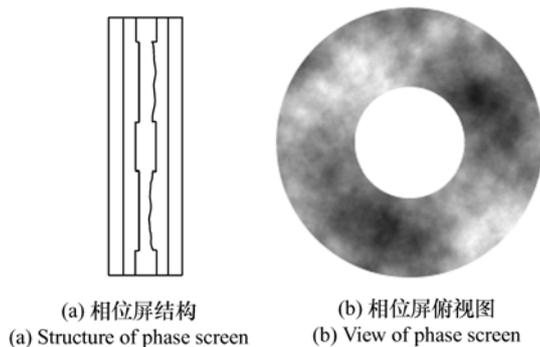


图3 随机相位屏

Fig.3 Random phase screen

Mantravadi 等人<sup>[9]</sup>以及甘新基等人<sup>[10]</sup>利用此静态物理相位屏搭建了湍流大气模拟系统,如图

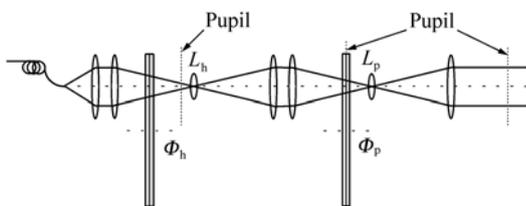


图4 基于静态相位屏的湍流模拟系统

Fig.4 Turbulence simulation system based on static phase screen

4 所示。他们从大气折射率结构常数  $C_n^2$  的角度对

系统进行了描述:

$$C_n^2(z) = \left[ \frac{2.01}{6.88} \left( \frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 \left( \frac{D}{BW} (N_s \delta_x) \right) \right]^{-5/3}. \quad (7)$$

其中:  $D$  是入瞳口径,  $BW$  是入射到相位屏上光斑的束宽,  $N_s$  是每个大气相干长度  $r_0$  上的采样点数,  $\delta_x$  是采样点在相位屏上的大小。该公式对于理解相位屏系统具有一定的参考价值。

Andrews 等人<sup>[3]</sup>在激光大气传输理论模型的基础上对激光在静态相位屏组成的湍流模拟系统中传输的数学模型进行了一定的研究。他通过对比相位屏和湍流之间的关系,以平面波经相位屏传输数学模型以及 Rytov 近似为基础,建立了 Kolmogorov 谱下的 Gaussian 光束经薄相位屏传输的数学模型。Tian 等人<sup>[11]</sup>在 Andrews 的基础上又进行了深入研究,给出了 Gaussian 经任意厚度相位屏传输的数学模型,并给出了闪烁指数,光强均值等量的解析表达式。

### 3 内场湍流仿真系统

#### 3.1 实验原理

为了配合实验室关于激光主动照明湍流效应影响的研究,课题组设计了实验室内湍流仿真系统,并且进行了相应的实验研究。实验原理如图5所示。

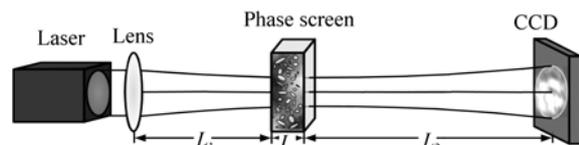
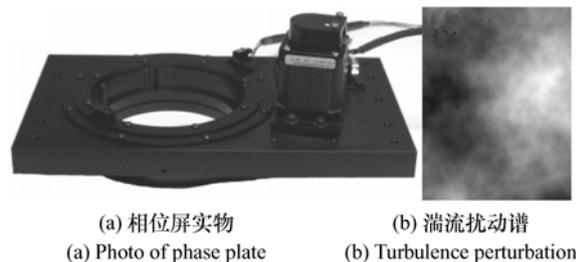


图5 室内湍流仿真实验原理图

Fig.5 Setup of turbulence simulation system



(a) 相位屏实物 (a) Photo of phase plate  
(b) 湍流扰动谱 (b) Turbulence perturbation

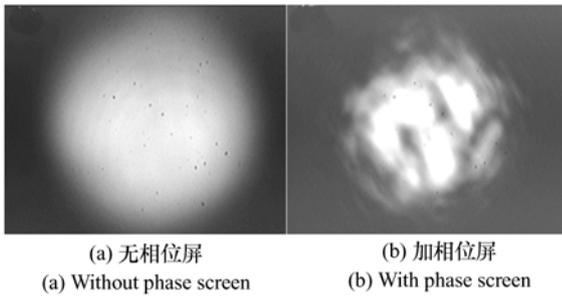
图6 静态相位屏

Fig.6 Static phase plate

实验系统的关键设备为静态相位屏,厚度为 22 mm。其结构如图 6 所示,其中图 6(右)为相位屏丙烯酸塑料所印满足 Kolmogorov 谱的湍流扰动灰度图。

### 3.2 实验结果

由于激光主动照明所关心的主要是目标出处激光照明场的强度,所以课题组对湍流仿真系统的能量分布情况进行了细致研究。图 7 为摄像机记录的两幅光强灰度图,(a)为不加相位屏时的光强值,(b)为加相位屏时摄像机所记录的某一



(a) 无相位屏 (b) 加相位屏  
(a) Without phase screen (b) With phase screen

图 7 摄像机记录的光强灰度图

Fig. 7 Irradiance of output plane taken by camera

帧光强灰度图。

首先分析高斯光束经过相位屏传输的光强分布。根据光束在弱湍流中传输理论<sup>[2]</sup>,光场对数振幅服从高斯分布,即对数振幅  $\chi = \ln(A/A_0)$  服从正态分布,其中  $A_0$  为自由空间传播光束振幅。由概率变换法可以求出光强  $I = A^2$  所服从的分布:

$$P_I(I) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_x I} \times \exp\left[-\frac{(\ln(\frac{I}{I_0}) - 2\langle\chi\rangle)^2}{8\sigma_x^2}\right], \quad (8)$$

其中: $I_0$ 为自由空间传输光强, $\langle\chi\rangle$ 为对数振幅均值, $\sigma_x^2$ 为对数振幅方差。光场对数振幅方差<sup>[2]</sup> $\sigma_x^2 \ll 1$ 时,有 $\sigma_I^2 \cong 4\sigma_x^2$ ,所以根据实验记录光强信息,可以求得对数振幅均值 $\langle\chi\rangle$ 和对数振幅方差 $\sigma_x^2$ ,而 $I_0$ 为不加相位屏时所记录的光强值。这样可以求出相位屏处于不同位置时的光强闪烁指数 $\sigma_I^2$ :

$$\sigma_I^2(r,L) = \frac{\langle I^2(r,L) \rangle}{\langle I(r,L) \rangle^2} - 1. \quad (9)$$

根据这些参数就可以得出高斯光束经相位屏

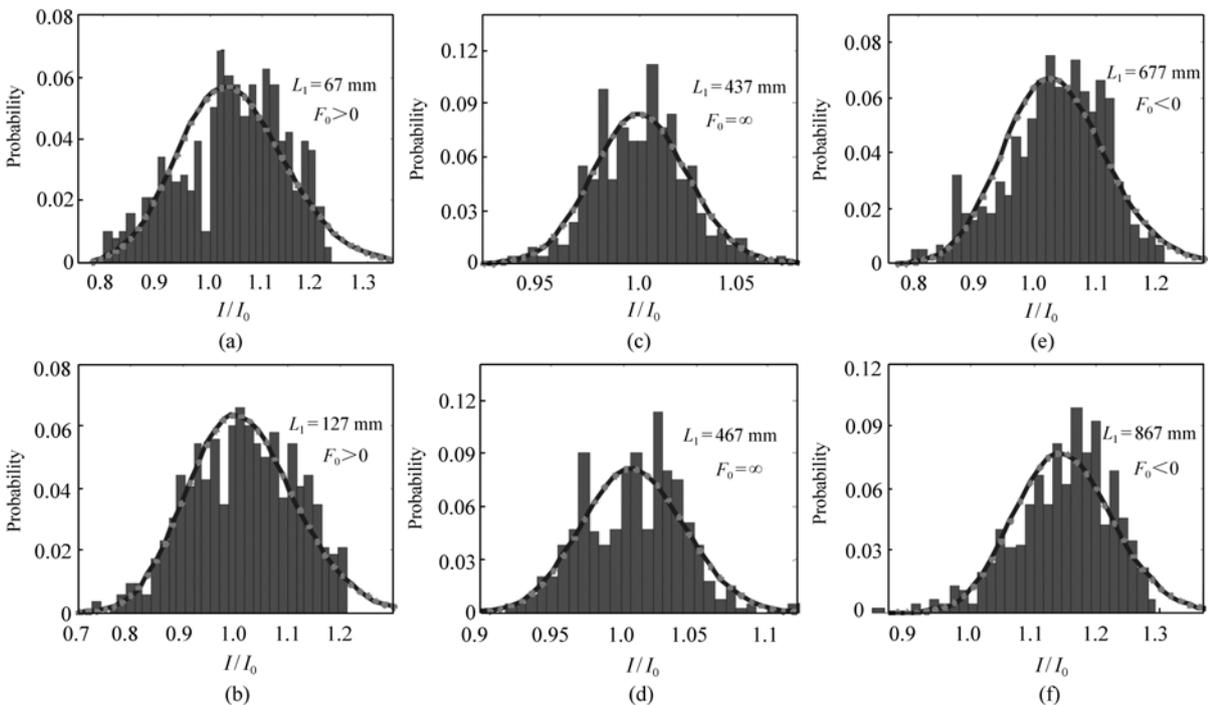


图 8 相位屏位于不同位置时的光强分布实验数据(直方图)与理论值(曲线)对比

Fig. 8 Comparison of experimental data(histogram) and theory results(curve) of light intensity distribution

传输时的光强分布理论值。图8给出了相位屏处于8个不同位置时光强分布理论值和实验结果的对比。图8(a)和(b)相位屏靠近入射面,为汇聚光束;(c)和(d)相位屏位于束腰位置,为准直光束;(e)和(f)相位屏位于出射面附近,为发散光束。从图中可以看出,高斯光束经过相位屏传输光强分布的实验结果与经过大气湍流传输光强分布的理论值相吻合,具有光束经过弱湍流传输的统计特性。通过对比,可以看出当相位屏位于入射面和出射面时光强分布较束腰位置分散,光强起伏严重。

## 4 结 论

本文以激光大气传输应用为基础,讨论了研

究湍流扰动的重要性,并对目前的两类仿真技术进行了详细描述。介绍了数值仿真的两种方法,FFT法和Zernike多项式法,给出了利用两种方法生成随机相位的详细过程,并且对比了两种方法的优劣之处。针对利用物理相位屏搭建湍流仿真系统,介绍了相位屏的制作,给出了搭建的系统,并且描述了湍流仿真系统的数学模型。

在此基础上,配合实验室关于激光照明主动成像技术的研究,设计搭建了实验室内湍流仿真系统,详细分析激光经实验仿真系统后的光场强度值,得到了仿真系统光场强度的统计分布。得到的仿真系统的所提供强度起伏的动态范围,为课题组研究激光照明主动成像提供了实验研究方法。本文的工作对于激光大气传输湍流扰动仿真技术的研究提供了理论依据。

### 参考文献:

- [1] 陈纯毅,杨华民,姜会林. 大气光通信中大气湍流影响抑制技术研究进展[J]. 兵工学报,2009,36(6):779-791.  
CHEN CH Y, YANG H M, JIANG H L, *et al.*. Research progress of mitigation technologies of turbulence effects in atmospheric optical communication[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 36(6): 779-791. (in Chinese)
- [2] TATARSKII V I. *Wave Propagation in a Turbulent Media*[M]. New York: McGraw-Hill, 1961.
- [3] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. *Laser Beam Propagation through Random Media* [M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE Press, 2005.
- [4] 张合勇,王挺峰,邵俊峰,等. 基于Mie散射的CO<sub>2</sub>激光大气传输特性测量[J]. 中国光学与应用化学, 2010, 3(4): 353-362.  
ZHANG H Y, WANG T F, SHAO J F, *et al.*. Measurement of CO<sub>2</sub> laser atmospheric transmission property based on Mie scattering[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2010, 3(4): 353-362. (in Chinese).
- [5] 张宇,李新阳,饶长辉. 基于空间频率域滤波的漫反射光大气湍流传输数值仿真方法[J]. 光学与光电技术, 2011, 9(5): 52-57.  
ZHANG Y, LI X Y, RAO CH H. Numerical simulation method of propagation of diffuse reflection optics based on frequency filtering[J]. *Opt. Optoelectronic Technology*, 2011, 9(5): 52-57. (in Chinese)
- [6] HERMAN B J, STRUGALA L A. Method for inclusion of low-frequency contributions in numerical representation of atmospheric turbulence[J]. *SPIE*, 1990, 1221: 183-192.
- [7] 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.  
ZHANG H M, LI X Y. Numerical simulation of wave front phase screen distorted by atmospheric turbulence[J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2006, 33(1): 14-19. (in Chinese)
- [8] CARBILLET M, RICCARDI A. Numerical modeling of atmospherically perturbed phase screens: new solutions for classical fast Fourier transform and Zernike methods[J]. *Appl. Optics*, 2010, 49(31): 47-52.
- [9] MANTRAVADI S V, RHOADARMER T A, GLAS R S. Simple laboratory system for generating well-controlled atmospheric-like turbulence[J]. *SPIE*, 2004, 5553: 290-300.
- [10] GAN X J, GUO J, FU Y Y. The simulating turbulence method of laser propagation in the inner field[J]. *J. Phys. : Conf. Ser.*, 2006, 48: 907-910.
- [11] TIAN Y Z, GUO J, WANG R, *et al.*. Mathematical model analysis of Gaussian beam propagation an arbitrary thickness random phase screen[J]. *Opt. Express*, 2011, 19(19): 18126-18228.

作者简介:李波(1972—),男,湖北随州人,硕士,工程师,主要从事光电设备的监造与验收方面的研究。

E-mail:li86@sina.com

王挺峰(1977—),男,山东文登人,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事激光应用技术方面的研究。

E-mail:wtfeng@sina.com

王弟男(1955—),男,河北唐山人,本科,工程师,主要从事航海光电探测特备的研制方面的研究。

E-mail:tiemuzhen.xiong@163.com

田玉珍(1985—),男,内蒙古呼和浩特人,博士研究生,主要从事激光主动照明成像,激光大气传输湍流效应等方面的研究。E-mail:tyzaizl@gmail.com

安雪晶(1972—),女,辽宁丹东人,硕士,副教授,主要从事数字图像处理及像质评价方面的研究。

E-mail:anjing720701@163.com

---

## 《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊, A4 开本; 刊号: ISSN 2095-1531/CN 22-1400/O4; 国内外公开发行人, 邮发代号: 国内 12-140, 国外 BM6782。

- ★ 中国科技核心期刊
- ★ 中国光学学会会刊
- ★ 中国学术期刊(光盘版)源期刊

**报道内容:**基础光学、发光理论与发光技术、光谱学与光谱技术、激光与激光技术、集成光学与器件、纤维光学与器件、光通信、薄膜光学与技术、光电子技术与器件、信息光学、新型光学材料、光学工艺、现代光学仪器与光学测试、光学在其他领域的应用等。

**发稿类型:**学术价值显著、实验数据完整的原创性论文; 研究前景广阔, 具有实用、推广价值的技术报告; 有创新意识, 能够反映当前先进水平的阶段性研究简报; 对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告; 以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

编辑出版: 《中国光学》编辑部

投稿网址: <http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址: [chineseoptics@ciomp.ac.cn](mailto:chineseoptics@ciomp.ac.cn); [zgxcn@126.com](mailto:zgxcn@126.com)

联系电话: 0431-86176852; 0431-84627061      传      真: 0431-84627061

编辑部地址: 长春市东南湖大路 3888 号(130033)