

# 艾里涡旋光束在大气湍流中的漂移特性研究

程 振 楚兴春 赵尚弘 邓博于 张曦文

空军工程大学, 陕西 西安 710000

**摘要** 采用多层相位屏法模拟了艾里涡旋光束在大气湍流中的漂移特性。讨论了拓扑电荷 $p$ 、涡旋核相对于光束中心的离轴距离 $x_a, y_a$ 和湍流强度 $C_n^2$ 对艾里涡旋光束在不同传输距离处的漂移特性的影响。研究发现,在相同传输距离处,漂移量随着 $C_n^2$ 的增大而增大。在传输距离比较小时, $p$ 和 $x_a, y_a$ 对漂移的影响比较弱,漂移量几乎相等。当传输距离比较大时,漂移量随 $p$ 的增大而减小,随 $x_a, y_a$ 的增大而增大。此外比较了单束艾里涡旋光束的漂移量和阵列艾里涡旋光束的漂移量,研究发现,阵列艾里涡旋光束的漂移量比较小。

**关键词** 大气光学; 艾里涡旋光束; 多层相位屏; 漂移

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1213002

## Study of the Drift Characteristics of Airy Vortex Beam in Atmospheric Turbulence

Cheng Zhen Chu Xingchun Zhao Shanghong Deng Boyu Zhang Xiwen

Airforce Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710000, China

**Abstract** The drift characteristics of Airy vortex beam in atmospheric turbulence are simulated based on multiple phase screens method. The drift characteristics influenced by topological charge  $p$ , the off-axis dislocations  $x_a, y_a$  of the vortices core from the optical center and the intensity of turbulence  $C_n^2$  are investigated in different distances. It is shown that the drifts increase with the increase of  $C_n^2$  in the same distance. When the distances are short, the drifts are nearly equal because of the weak influence of  $p$  and  $x_a, y_a$ . When the distances are long enough, the drifts decrease with the increase of  $p$ , but increase with the increase of  $x_a, y_a$ . In addition, by comparing the drifts of single Airy vortex beam with the Airy vortex array beams, it is shown that the drifts of Airy vortex array beams are smaller.

**Key words** atmospherical optics; Airy vortex beam; multiple phase screens; drifts

**OCIS codes** 140.3570; 050.1950; 260.5430

## 1 引言

近年来,艾里光束<sup>[1]</sup>作为无衍射光束的一种,以其近似无衍射、横向自加速和自愈等独特性质受到广泛的关注。自2007年Siviloglou等在实验上第一次产生艾里光束起,艾里光束的产生方法<sup>[2-3]</sup>、轨迹控制方法<sup>[4-5]</sup>和在微粒操控<sup>[6]</sup>、光子弹<sup>[7]</sup>和等离子通道<sup>[8]</sup>等领域的应用一直是研究热点。Gu等<sup>[9]</sup>研究了艾里光束阵列在大气中传输的闪烁特性,研究发现4束艾里光束阵列的闪烁接近理论最小值。Tao等<sup>[10]</sup>给出了艾里光束在大气中传输时的光束扩展表达式,并讨论了大气湍流强度和大气内外尺度对光束扩展的影响。王晓章等<sup>[11]</sup>用液晶空间光调制器模拟了艾里光束在Kolmogorov湍流中光束质心漂移,并且与高斯光束做对比,研究发现,艾里光束的漂移要小于高斯光束,可以看出艾里光束作为信息载体应用到大气通信时,具有比高斯光束更好的抗干扰能力。

涡旋光束是一种相位具有螺旋结构、光场中存在相位奇点的光束<sup>[12]</sup>。奇点光学在光镊技术、微粒操控和光学波导等领域有广泛的应用<sup>[13-14]</sup>。将光涡旋植入到高斯光束中可得到高斯涡旋光束<sup>[15]</sup>,同样将光涡旋植入到艾

收稿日期: 2015-06-03; 收到修改稿日期: 2015-07-28

作者简介: 程 振(1991—),男,硕士研究生,主要从事空间激光通信方面的研究。E-mail: 2008cheng.2008@163.com

导师简介: 赵尚弘(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事空间激光通信方面的研究。E-mail: zhaoshangh@aliun.com

里光束中可得到艾里涡旋光束。天津大学的 Dai 等<sup>[16-17]</sup>在理论上研究了艾里涡旋光在真空中的传输特性,并在实验上得到验证。2013 年 Deng 等<sup>[18]</sup>研究了艾里涡旋光束在单轴晶体中的传输,研究发现艾里涡旋光束在两个横向上都具有加速特性。浙江大学的 Chen 等<sup>[19]</sup>研究了艾里涡旋光束横电模和横磁模的远场特性,并讨论了截断因子和拓扑电荷对能流分布的影响。但艾里涡旋光束在大气湍流中的传输特性还未见研究报道。

本文采用多层相位屏法模拟了艾里涡旋光束在大气湍流中传输时的漂移特性,并讨论了湍流强度、拓扑电荷和涡旋核位置对漂移的影响,比较了单束艾里涡旋光束、艾里光束阵列和艾里涡旋光阵列在不同湍流强度下漂移特性。

## 2 理论模型

研究激光束在大气湍流中传输的方法,主要有广义惠更斯-菲涅耳原理<sup>[20]</sup>、Rytov 微扰近似法<sup>[21]</sup>和多层相位屏法<sup>[22]</sup>。广义惠更斯-菲涅耳原理既能用于弱起伏条件也能用于强起伏条件,Rytov 微扰近似法只能用于弱起伏条件。多层相位屏法是研究光束在大气湍流中传输的主要方法,不仅能应用于强弱起伏条件而且能模拟出大气湍流的随机特性。根据多层相位屏的主要思想可写出光束从  $z_{i-1}$  平面到  $z_i = z_{i-1} + \Delta z$  平面的光场分布<sup>[23]</sup>:

$$E(x, y, z_i) = F^{-1} \left\{ \exp \left[ -\frac{idz}{2k} (K_x^2 + K_y^2) \right] F \left\{ \exp [j\varphi(x, y, z_i)] E(x, y, z_{i-1}) \right\} \right\}, \quad (1)$$

式中  $\varphi(x, y, z_i)$  表示该路段对应的相位调制; $K_x, K_y$  为  $x, y$  方向上的空间波数; $k = 2\pi/\lambda$  为波数, $\lambda$  为激光波长。 $F$  表示傅里叶变换, $F^{-1}$  表示逆傅里叶变换。 $E(x, y, z)$  表示艾里涡旋光束的场分布,其初始场分布为<sup>[16-17]</sup>

$$E(x, y, 0) = f_{\text{Ai}} \left( \frac{x}{w_0} \right) \exp \left( a \frac{x}{w_0} \right) f_{\text{Ai}} \left( \frac{y}{w_0} \right) \exp \left( a \frac{y}{w_0} \right) \left[ (x - x_0) + i(y - y_0) \right]^p, \quad (2)$$

式中  $f_{\text{Ai}}$  表示 Airy 函数, $a$  表示截断因子, $w_0$  表示任意横向刻度, $x_0, y_0$  表示涡旋核相对于光束中心的离轴距离, $p$  表示拓扑电荷。

由于大气湍流具有随机特性,在实验中很难实现,而采用数值模拟的方法可以有效地仿真随机扰动环境。目前随机相位屏的模拟方法主要有两种:一种是 Zernike 多项式法<sup>[24]</sup>,采用正交的 Zernike 多项式作为基函数表示相位波前分布。但是这种方法存在高频成分不足的情况;另外一种功率谱反演法<sup>[25]</sup>,即用大气功率谱函数对随机生成的 Hermitian 复高斯矩阵进行滤波,再经逆傅里叶变换得到相位分布。这种方法简单快捷但存在低频成分不足的情况,可以采用次谐波补偿法<sup>[26]</sup>和非均匀采样法<sup>[27]</sup>对此方法进行改善,改善后的大气相位结构函数与理论值基本相符。功率谱反演法可以用以下离散化的公式来表示<sup>[28]</sup>:

$$\varphi(m, n) = \sum_{m'=-N_x/2}^{N_x/2-1} \sum_{n'=-N_y/2}^{N_y/2-1} h(m', n') f(m', n') \exp \left[ i2\pi \left( \frac{mm'}{N_x} + \frac{nn'}{N_y} \right) \right], \quad (3)$$

$$f(m', n') = \frac{2\pi}{\sqrt{L_x L_y}} \sqrt{0.00058} r_0^{-5/6} (f_x^2 + f_y^2 + L_0^{-2})^{-1/12}, \quad (4)$$

式中  $L_x, L_y$  表示相位屏的大小, $L_0$  表示大气湍流外尺度, $h(m', n')$  表示离散化 Hermitian 复高斯随机矩阵, $r_0 = 0.185(\lambda^2/C_n^2 dz)^{3/5}$  表示大气相干长度, $C_n^2$  表示大气折射率结构函数, $N_x, N_y$  表示  $x, y$  轴上的采样点, $f_x = m'/L_x, f_y = n'/L_y$ 。值得一提的是,由于功率谱反演法并没有采用次谐波补偿法和非均匀采样法来补偿低频成分,所以文中模拟的相位屏存在低频成分不足的情况,这里不做进一步讨论。

## 3 数值模拟

### 3.1 单束艾里涡旋光束漂移特性

光束在大气湍流中传输时由于受到扰动的影响,会出现光束扩展、闪烁和漂移<sup>[29]</sup>,这些特性对于大气激光通信有很大影响。离散化的光束质心定义为<sup>[11]</sup>

$$x_c = \frac{\sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} x_i |E(x_i, y_j, z)|^2}{\sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} |E(x_i, y_j, z)|^2}, \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} y_j |E(x_i, y_j, z)|^2}{\sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} |E(x_i, y_j, z)|^2}, \quad (5)$$

式中  $x_c, y_c$  表示光束质心的坐标。以真空中艾里涡旋光束的质心坐标作为参考值,根据以上模型,采用多层相位屏法研究在不同参数下艾里涡旋光束的漂移特性。相位屏之间的距离是  $\Delta z=50$  m,相位屏数量由  $z/\Delta z$  决定,相位屏大小  $0.3$  m $\times$  $0.3$  m,采用点数  $1024\times 1024$ ,波长是  $632.8$  nm。大气湍流功率谱选择 Kolmogorov 模型,由于大气湍流模拟的随机特性,下文中提到的漂移量都是 30 组数据的平均值。艾里涡旋光束的截断因子  $a=0.01, w_0=0.01$  m,  $L_0=2$  m。

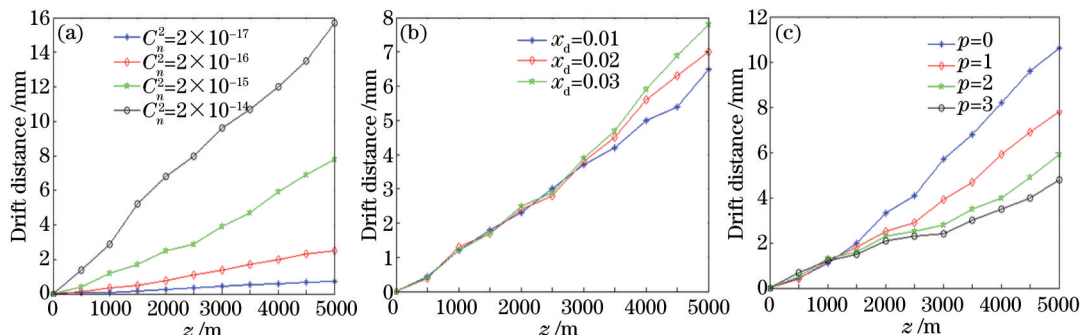


图 1  $C_n^2, x_d, p$  对质心漂移的影响

Fig.1 Drifts of centroid influenced by  $C_n^2, x_d, p$

图 1(a)给出了不同湍流强度下,艾里涡旋光束在大气中的漂移特性,其中  $p=1, x_d=y_d=0.03$  m。从图中可以看出,随着湍流强度的增大,艾里涡旋光束在传输过程中受到的扰动增大,其漂移量也增大。在同等湍流下,由于艾里涡旋光束在传输过程中,光强减小,抗干扰能力减小,因此漂移量随之增大。图 1(a)中漂移量的标准差随湍流强度增大而增大,分别是 0.25, 0.88, 2.63, 5.08。可见在弱湍流强度时,漂移量增大的幅度比较小。在强湍流下,漂移量增大的幅度随之增大。

图 1(b)给出了艾里涡旋光束在不同  $x_d, y_d$  时,漂移量随传输距离的变化,其中  $C_n^2 = 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}, p=1, x_d, y_d$  取相等的值。从图中可以看出,在传输距离比较短时,不同  $x_d$  值对艾里涡旋光束的漂移量影响比较弱,几乎重合在一起分不出大小。当传输距离达到 3 km 以后,艾里涡旋光束的漂移曲线才逐渐分离开。标准差随  $x_d, y_d$  的增大而增大,其值分别是 2.11, 2.38, 2.63。 $x_d, y_d$  的值越小,对漂移量的影响越小。

图 1(c)给出了不同  $p$  值时,漂移随传输距离的变化,其中  $C_n^2 = 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}, x_d=y_d=0.03$  m。在传输距离比较小时,不同  $p$  值的质心漂移比较接近。在传输距离大于 1.5 km 后,漂移量随传输距离的增大而逐渐分离开,并且随着  $p$  值的增大而减小。可见,艾里涡旋光在大气湍流中传输的质心漂移比艾里光束 ( $p=0$ ) 的漂移要小。艾里光束漂移的标准差是 3.73,艾里涡旋光束漂移的标准差在  $p=1, 2, 3$  下的值分别是 2.63, 1.81, 1.45。标准差随  $p$  值的增大而减小, $p$  值越小对艾里涡旋光束影响越大。

### 3.2 阵列艾里涡旋光束漂移特性

阵列合成技术是获得高功率激光输出的有效途径之一,能提高激光在大气湍流中传输时的抗干扰能力,有效抑制由于扰动带来的光束扩展、闪烁和漂移等负面效应<sup>[30]</sup>。阵列合成激光在大气湍流中的传输和演化规律已经成为研究热点,在空间激光通信和激光传播工程等领域有很大的应用前景。

图 2 给出了 4 束艾里光束阵列和 4 束艾里涡旋光束阵列在聚焦点处的强度分布(其中  $C_n^2 = 2 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ )。图 3(a)给出了不同  $p$  值下,4 束相干合成的艾里涡旋光束阵列在大气湍流中传输时,聚焦点处的漂移特性。阵列的排列方式是径向圆形排列,半径是 0.042 m,任意横向刻度  $w_0=0.01$  m,聚焦点在传输距离 4.5 km 处。从图 3(a)中可以看出,随着湍流强度的增大,漂移也随之增大。艾里涡旋光束阵列的漂移比单束艾里光束阵列 ( $p=0$ ) 的漂移要小。 $p=0$  到 3 取值时,漂移的标准差分别是 1.67, 1.30, 1.16, 1.03。可见相比于单光束情况下,阵列光束的标准差更小,系统更稳定。图 3(b)给出了  $C_n^2 = 2 \times 10^{-15}, 2 \times 10^{-16}, 2 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$  时,不同  $x_d$  值下单束艾里涡旋光的漂移和艾里涡旋光阵列在聚焦点的漂移大小的对比。从图中可以看出,在不同湍流强度下艾里涡旋光阵列的漂移随  $x_d$  的增大而减小。在相同条件下,艾里涡旋光束阵列的漂移要小于单束艾里涡旋光束的漂移。

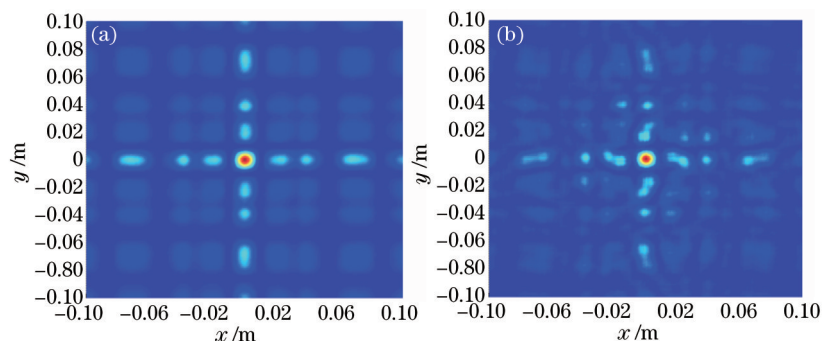


图2 (a)艾里光束阵列和(b)艾里涡旋光束阵列的强度分布

Fig.2 Intensity distributions of (a) Airy array beams and (b) vortex Airy array beams

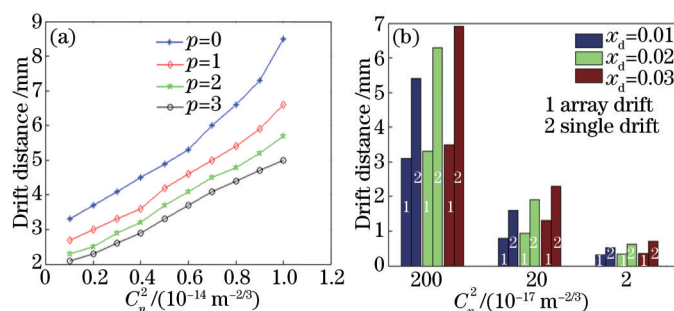


图3  $C_n^2$ 对艾里涡旋光束阵列漂移的影响

Fig.3 Influenced on drifts of vortex Airy array beams by  $C_n^2$

## 4 结 论

采用多层相位屏法研究了单束艾里涡旋光束和阵列艾里涡旋光束在大气湍流中传输时的漂移特性,并与单束艾里光束和阵列艾里光束的漂移大小做了比较。研究发现,艾里涡旋光束的漂移比艾里光束的漂移要小,说明艾里涡旋光束的抗干扰性能更好。阵列艾里涡旋光束的漂移小于单束艾里涡旋光束的漂移,阵列光束具有更强的抗干扰能力。还讨论了拓扑电荷 $p$ 、涡旋核相对于光束中心的离轴距离 $x_d, y_d$ 和湍流强度 $C_n^2$ 对漂移的影响。研究发现,漂移量随 $C_n^2$ 的增大而增大。在传输距离比较小时,艾里涡旋光束的强度比较大,此时抗干扰能力比较大, $p$ 和 $x_d, y_d$ 对质心漂移的影响比较弱,质心漂移几乎重合在一起。随着传输距离逐渐增大,艾里涡旋光束的抗干扰能力减小,质心漂移随 $p$ 的增大而减小,随 $x_d, y_d$ 的增大而增大。从研究结果可以看出,艾里涡旋光束用于大气通信具有更好的抗干扰能力。

## 参 考 文 献

- Berry M V, Balazs N L. Nonspreading wave packets[J]. Am J Phys, 1979, 47(3): 264-267.
- Cheng Zhen, Zhao Shanghong, Chu Xingchun, et al.. Research progress of the generation methods of Airy beam[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 030008.  
程 振, 赵尚弘, 楚兴春, 等. 艾里光束产生方法的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 030008.
- Dai H T, Sun X W, Luo D, et al.. Airy beams generated by a binary phase element made of polymer- dispersed liquid crystals[J]. Opt Express, 2009, 17(22): 19365.
- Yi Hu, Peng Zhang, Cibo Lou, et al.. Optimal control of the ballistic motion of Airy beams[J]. Opt Lett, 2010, 35(13): 2260-2262.
- Cheng Zhen, Chu Xingchun, Zhao Shanghong, et al.. Research progress of Airy beam's propagation trajectory control[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 060002.  
程 振, 楚兴春, 赵尚弘, 等. 艾里光束控制传输轨迹方法的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6): 060002.
- Cheng Hua, Zang Weiping, Tian Jianguo. Study on optical trapping and propulsion of small particles by Airy beam[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(s1): s100405.  
程 化, 臧维平, 田建国. 艾里光束对微小颗粒的捕获和输运研究[J]. 光学学报, 2011, 31(s1): s100405.
- Abdollahpour D, Suntsov S, Papazoglou D, et al.. Spatiotemporal Airy light bullets in the linear and nonlinear regimes[J]. Phys Rev Lett,

- 2010, 105(25): 253901.
- 8 Polynkin P, Kolesik M, Moloney J V, *et al.*. Curved plasma channel generation using ultraintense Airy beams[J]. *Science*, 2009, 324(5924): 229–232.
- 9 Gu Y, Gbur G. Scintillation of Airy beam arrays in atmospheric turbulence[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(20): 3456–3458.
- 10 Tao Rumao, Si Lei, Ma Yanxing, *et al.*. Average spreading of finite energy Airy beams in non-Kolmogorov turbulence[J]. *Opt Laser Eng*, 2013, 51(4): 488–492.
- 11 Wang Xiaozhang, Li Qi, Zhong Wen, *et al.*. Drift behavior of Airy beams in turbulence simulated by using a liquid crystal spatial light modulator[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1213001.  
 王晓章, 李 琪, 钟 文, 等. 液晶空间光调制器模拟艾里光束在湍流中的漂移[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1213001.
- 12 Cullet P, Gill L, Rocca F. Optical vortices[J]. *Opt Commun*, 1989, 73(5): 403–408.
- 13 Simpson N B, Allen L, Padgett M J. Optical tweezers and optical spanners with Laguerre– Gaussian modes[J]. *J Mod Opt*, 1996, 43(12): 2485–2491.
- 14 Simpson N B, Dholakia K, Allen L, *et al.*. Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: An optical spanner[J]. *Opt Lett*, 1997, 22(1): 52–54.
- 15 Wang Haiyan, Chen Chuanlin, Du Jialei. Propagation of Bessel–Gaussian beam with vortices in turbulence atmosphere[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2013, 42(5): 505–510.  
 王海燕, 陈川琳, 杜家磊. 贝塞尔高斯涡旋光束在大气中传输特性[J]. *光子学报*, 2013, 42(5): 505–510.
- 16 Dai H T, Liu Y J, Luo D, *et al.*. Propagation dynamics of an optical vortex imposed on Airy beam[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(23): 4075–4077.
- 17 Dai H T, Liu Y J, Luo D, *et al.*. Propagation dynamics of an optical vortex carried by an Airy beam: Experimental implementation[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(9): 1617–1619.
- 18 Deng Dongmei, Chen Chidao, Zhao Xin. Propagation of an Airy vortex beam in uniaxial crystals[J]. *Appl Phys B*, 2013, 110(3): 433–436.
- 19 Chen Ruipin, Chew Khian–Hool. Far–field properties of a vortex Airy beam[J]. *Laser Part Beams*, 2013, 31(1): 9–15.
- 20 Andrews L C, Phillips R L. *Laser Beam Propagation through Random Media (2nd Edition)*[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005.
- 21 Peleg A, Moloney J V. Scintillation reduction by use of multiple Gaussian laser beams with different wavelengths[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(12): 883–889.
- 22 Johansson E M, Gavel D T. Simulation of stellar speckle imaging[C]. SPIE, 1994, 2200: 372–383.
- 23 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun, *et al.*. Propagation performance of adaptive phase–locked fiber laser array in turbulent atmosphere[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(6): 1442–1447.  
 周 朴, 刘泽金, 许晓军, 等. 自适应锁相光纤激光阵列的湍流大气传输性能[J]. *中国激光*, 2009, 36(6): 1442–1447.
- 24 Wang Qitao, Tong Shoufeng, Xu Youhui. On simulation and verification of the atmospheric turbulent phase screen with Zernike polynomials [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1907–1911.  
 王奇涛, 佟首峰, 徐友会. 采用Zernike多项式对大气湍流相位屏的仿真和验证[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(7): 1907–1911.
- 25 Yan H X. Numerical simulation of an adaptive optics system with laser propagation in the atmosphere[J]. *Appl Opt*, 2000, 39(18): 3023–3031.
- 26 Lane R G, Glindemann A, Dainty J C. Simulation of a Kolmogorov phase screen[J]. *Waves in Random Media*, 1992, 2(3): 209–224.
- 27 Cai Dongmei, Wang Kun, Jia Peng, *et al.*. Sampling methods of power spectral density method simulating atmospheric turbulence phase screen[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(10): 140217.  
 蔡冬梅, 王 昆, 贾 鹏, 等. 功率谱反演大气湍流随机相位屏采样方法的研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(10): 140217.
- 28 Wang Lijin, Li Qiang, Wei Honggang. Numerical simulation and validation of phase screen distorted by atmospheric turbulence[J]. *Opto–Electronic Engineering*, 2007, 34(3): 1–4.  
 王立瑾, 李 强, 魏宏刚. 大气湍流随机相位屏的数值模拟和验证[J]. *光电工程*, 2007, 34(3): 1–4.
- 29 Ji Xiaoling. Influence of atmospheric turbulence on the spreading and directionality of radial Gaussian array beams[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(1): 692–697.  
 季小玲. 大气湍流对径向分布高斯阵列光束扩展和方向性的影响[J]. *物理学报*, 2010, 59(1): 692–697.
- 30 Wu Wuming, Ni Yu, Ren Yajie, *et al.*. Research progress of scintillations for laser array beams in atmospheric turbulence[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7): 070008.  
 吴武明, 宁 禹, 任亚杰, 等. 阵列光束在湍流大气中传输的光强闪烁研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(7): 070008.

栏目编辑: 王晓球