

实验模拟环形艾里光束在大气扰动中的光束漂移

王晓章 唐 峰 原勳捷 李 睿 段德军 张 辉 陈瑞宁

西安现代控制技术研究, 陕西 西安 710065

摘要 采用多层相位屏法和分步傅里叶算法相结合的方式模拟环形艾里光束在湍流大气中传输时光斑质心漂移。通过理论和实验仿真了环形艾里光束在湍流中的传输。通过比较,证实了环形艾里光束在湍流中传输时扰动漂移量小于艾里光束和高斯光束。因此,利用环形艾里光束作为信息载体在远距离传输时具有很大的应用潜力。

关键词 大气光学;空间光调制器;环形艾里光束;湍流;相位调制

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0813001

Experimental Simulation of Circular-Airy Beam Drift in Atmospheric Turbulence

Wang Xiaozhang Tang Feng Yuan Mengjie Li Rui Duan Dejun

Zhang Hui Chen Ruining

Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract The method of combined multiple phase screens and split-step Fourier to simulate the drift behavior of circular-Airy beams in atmospheric turbulence is proposed. The propagation of circular-Airy beams in turbulence is simulated theoretically and experimentally. Through comparing the drift behavior of Airy beams with related Gaussian beam, it is found that the drift distances of circular-Airy beams are less than that of reference beams. Therefore, employing the circular-Airy beams as information carrier has potential application for long-distance transmission.

Key words atmospheric optics; spatial light modulator; circular-Airy beams; turbulence; phase modulation

OCIS codes 010.7060; 230.6120; 060.5060

1 引 言

艾里光束是一种无衍射光束,它的基本特性之一是可自我修复,这一特点使其在扰动环境下传输时能保证其强度分布轮廓受影响较小^[1]。环形艾里光束作为典型艾里光束的衍生之一,则具有独特的自会聚特性^[2],作为信息载体在远距离传输时具有重要的应用潜力。本文对环形艾里光束在扰动环境中的传输特性展开了分析。通常,研究激光束在大气扰动中的传输特性,一般采用理论分析、数值模拟和真实环境下实验测量等方法,但是由于目前现有理论不够完善,存在各种局限性,不能够对大气扰动引起的各种效应进行准确判断,而真实环境下实验测量则对硬件要求很高,所需成本很高,这些客观因素使得数值模拟成为研究这一问题的折中选择。相位屏法数值模拟大气扰动就是其中之一,其本质是在传输过程中根据随机产生的相位来模拟湍流对光束调制和干扰,其优点是在一定的条件下进行的一组数值模拟既可以为研究人员提供传输光场的各种统计特性又可按要求产生足够多的样本^[3-4]。因此这一方法目前已成为研究光束在大气扰动中传输问题的有效手段。基于这一思想,本文采用多层相位屏方法和分步傅里叶迭代算法相结合的方式模拟环形艾里光束在大气扰动中的传输。

收稿日期: 2015-01-13; 收到修改稿日期: 2015-03-04

作者简介: 王晓章(1982—),男,博士,工程师,主要从事光束控制和光纤传感方面的研究。

E-mail: xiaozhang-wang@aliyun.com

2 理论介绍

2.1 环形艾里光束

无限能量艾里光束理论是 Berry 等^[5]于 1979 年提出的,他们首先证明了艾里函数是薛定谔方程的一个精确解,2007 年,美国中佛罗里达大学的 Siviloglou 等^[6]提出了有限能量艾里光束,其振幅 ϕ 可表示为

$$\phi(s, 0) = A(s)\exp(as), \quad (1)$$

式中 $A(\cdot)$ 为艾里函数, a 为衰减系数, $a > 0$, s 为一维无量纲横向坐标。

对(1)式进行傅里叶变换可以得到艾里光束的频谱,可表示为

$$\Phi_0(\kappa) = \exp(-a\kappa^2)\exp\left[\frac{i}{3}(\kappa^3 - 3a^2\kappa - ia^3)\right], \quad (2)$$

式中 κ 表示空间频率。从(2)式中可以看出频域空间里艾里光束的空间相位分布为高斯形式和三次方形式的乘积,因此人们通常在实验中观察艾里光束是通过高斯光束进行三次方相位调制,再经过傅里叶透镜来实现^[7-8]。将直角坐标系转换为柱坐标系,可由一维艾里光束得到环形艾里光束,其初始波函数可以表示为^[9]

$$\phi = A\left[\frac{(R_0 - R)}{r_0}\right] \cdot \exp\left\{a\left[\frac{(R_0 - R)}{r_0}\right]\right\}, \quad (3)$$

式中 R_0 为柱坐标下艾里光束的入射初始半径, R 为横向光场坐标, r_0 为归一化常数。环形艾里光束的相位分布如图 1 所示。

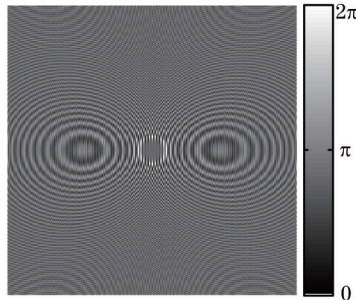


图 1 环形艾里光束的相位分布图样

Fig.1 Phase pattern of circular-Airy beams

2.2 模拟湍流相位计算

将光束在真空中传播和随机介质因折射率起伏引起的相位调制看作是两个相互独立并同时进行的过程,基于这一思想,就可以将连续的随机介质分割成一系列厚度为 Δz 的平行薄屏,光束每经过一个薄屏,就完成了一次相位调制。光束依次通过多个薄屏,就可模拟在大气中的传播过程。假设光束经过随机相位屏的调制后在自由空间传播到下一个相位屏的位置,每个传播段内大气仅改变了光束的相位分布而并不影响其振幅。采用这种多层相位屏方法来模拟大气扰动的思想就构成了光束在大气中传播数值模拟的数理基础^[10]:

$$u(r, z_{m+1}) = \exp\left[\frac{i}{2k} \int_{z_m}^{z_{m+1}} \nabla_{\perp}^2 dz\right] \exp[i\varphi(r, z_m)]u(r, z_m), \quad (4)$$

式中 u 为振幅分布, r 为柱坐标系下横向坐标, k 为波数, $\varphi(\cdot)$ 为大气扰动相位, z_m 为第 m 个相位屏的距离。

数值模拟方法光束传播的关键之处在于相位屏的生成,目前产生相位屏的方法有两种:一种是根据大气湍流的功率谱密度函数的逆傅里叶变换得到大气扰动的相位分布,这种方法被称作是“功率谱反演法”;另一种是采用正交的 Zernike 多项式作为基函数来表示相位波前分布,称为“Zernike 多项式展开法”。因为功率谱反演法模拟相位屏的方法比较简单而且计算过程比较快捷,其中反演所采用的快速傅里叶变换使得这种方法非常有效。因此,目前普遍采用功率谱反演相位分布的方法来模拟相位屏。这一方法的基本思想是:首先生成一个复高斯随机数矩阵,再借助于符合 Kolmogorov 大气相位扰动的功率谱函数对其进行滤波,然后对其进行逆傅里叶变换得到相位分布。这一过程的数学表达式可以描述为^[11]

$$\varphi(x, y) = \sum_{k_x} \left\{ \sum_{k_y} h(k_x, k_y) \sqrt{F_{\varphi}(k_x, k_y)} \exp[i(k_x x + k_y y)] \Delta k_x \cdot \Delta k_y \right\}, \quad (5)$$

式中 k_x 和 k_y 表示空间波数, $\Delta k_x \cdot \Delta k_y$ 为控制相位屏方差的调节系数, $h(k_x, k_y)$ 表征频域内的零均值单位方差

的 Hermitian 复高斯随机变量, $F_\phi(k_x, k_y)$ 为大气折射率起伏引起的满足 Kolmogorov 谱的功率谱函数。功率谱反演计算得到的湍流随机相位分布如图 2 所示。

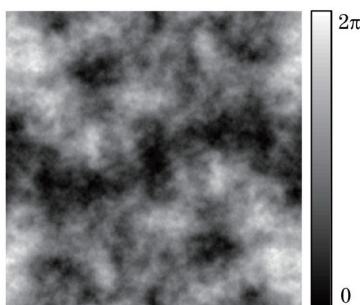


图 2 湍流相位分布

Fig.2 Distribution of turbulence phases

3 分步傅里叶算法模拟环形艾里光束的传输

针对激光束在大气扰动中的传输过程,利用分布傅里叶算法来迭代,基本思路是:将扰动随机相位屏对光束的相位调制作为外界对光束的非线性调制;将在真空中传播部分看作是与外界相位调制无关的独立过程;光束穿过一个相位屏和一个真空层的过程可分成先完成相位调制后完成衍射传输两个部分,假设这两个过程相互独立。基于这一思路,将光束在大气扰动中的传输过程分成多个子过程,依次对每个子过程进行数值求解,就可以实现对环形艾里光束在大气扰动中传输的整个过程实现数值模拟,这与之前的多相位屏模拟步骤可实现严格匹配。对于某一子过程 $z_0 + \Delta z$,分步傅里叶算法的数学物理过程可以描述为

$$\begin{cases} \phi_1\left(x, z_0 + \frac{\Delta z}{2}\right) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}\left[\phi(x, z_0)\right] \exp\left(-ik^2 \frac{\Delta z}{2}\right)\right\} \\ \phi_2\left(x, z_0 + \frac{\Delta z}{2}\right) = \phi_1\left(x, z_0 + \frac{\Delta z}{2}\right) \exp[i\varphi(x)] \\ \phi_3(x, z_0 + \Delta z) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}\left[\phi_2(x, z_0)\right] \exp\left(-ik^2 \frac{\Delta z}{2}\right)\right\} \end{cases}, \quad (6)$$

式中 ϕ_1 、 ϕ_2 和 ϕ_3 分别表示振幅分布, z_0 为初始坐标, Δz 为一个子过程的传输距离, \mathcal{F} 和 \mathcal{F}^{-1} 分别表示傅里叶变换和逆傅里叶变换过程, x 为横向坐标。其中第一个公式描述传输光束的线性衍射过程,用来计算激光束在线性空间的传输解;第二个公式用于计算某一个扰动随机相位屏对光束的相位调制;第三个公式为迭代步骤,求解光束从 z_0 位置开始经过 Δz 距离后的输出解。其计算过程的流程图如图 3 所示。其中 $\varphi_j(x', y')$ 为第 j 个相位屏的相位分布函数。

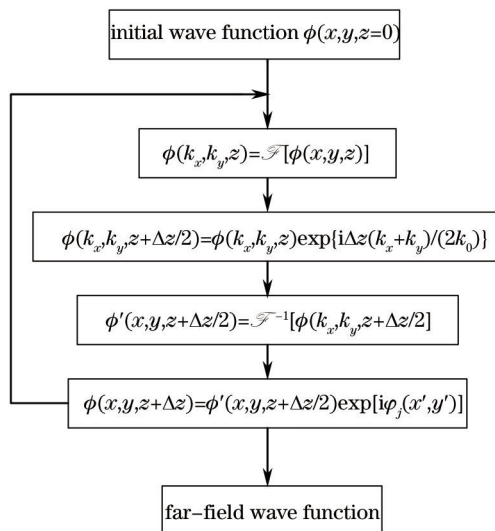


图 3 分步傅里叶算法的计算流程图

Fig.3 Diagram of split-step Fourier method

下面针对环形艾里光束在真空中和有扰动空气中的传输展开理论模拟。以(3)式初始波函数,首先仿真计算环形艾里光束在无扰动条件下的传输情况,取随机相位 $\varphi(x,y)$ 为零,以光束的初始波函数为入射条件,模拟结果如图4所示,其中图4(a)为光束在传输方向上的光强分布演化,图4(b)~(d)分别为对应图4(a)中1、2和3处的强度分布。从图4中可以看出,环形艾里光束在传输过程中存在急剧自会聚现象。

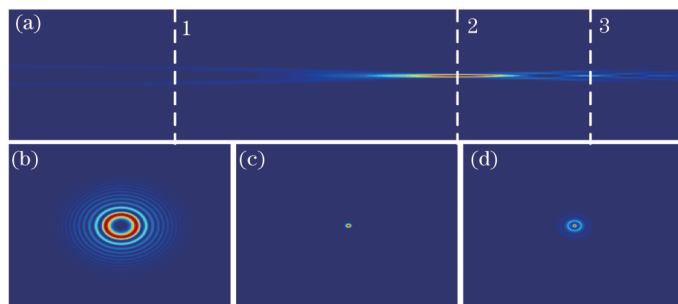


图4 无扰动时环形艾里光束的传输。(a) 光束在传输方向上的光强分布演化;(b)~(d)分别对应图(a)中1、2和3处的光场强度分布
Fig.4 Propagation of circular-Airy beams without turbulence. (a) Beam intensity distribution on the transmission direction of evolution; (b)~(d) light field intensity distribution on the position of 1, 2, and 3 in Fig. (a) respectively

当考虑环形艾里光束在弱流场中传输时,将根据(5)式计算出的系列扰动随机相位加入计算,模拟结果如图5所示。

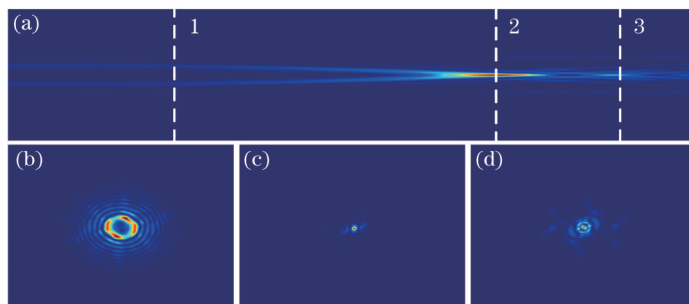


图5 环形艾里光束在湍流中的传输。(a) 光束在传输方向上的光强分布演化;(b)~(d)分别对应图(a)中1、2和3处的光场强度分布
Fig.5 Propagation of circular-Airy beams in turbulence. (a) Beam intensity distribution on the transmission direction of evolution; (b)~(d) light field intensity distribution on the position of 1, 2, and 3 in Fig. (a) respectively

分析光束在湍流中传输时存在的漂移行为,可基于光束质心变化来展开讨论^[12]。其中光斑质心定义为

$$\begin{cases} x_c = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i |u(x_i, x_j)|^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |u(x_i, x_j)|^2} \\ y_c = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_j |u(x_i, x_j)|^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |u(x_i, x_j)|^2} \end{cases}, \quad (7)$$

式中 N 为光斑个数。根据分步傅里叶算法结合多相位屏可以模拟出光斑质心的位置,定义无扰动时光束质心位置在坐标原点。计算过程中光波长为 1550 nm,扰动强度取 $C_n^2 = 2 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,传输距离为 1000 m,随机相位屏取样为 120 个,数值计算出环形艾里光束光斑质心分布情况,结果如图6所示,最终计算得环形艾里光束的平均漂移量为 1.01 mm。

4 实验模拟环形艾里光束的传输

4.1 实验装置

实验装置如图7所示。实验中光源为输出中心波长为 532 nm 的半导体激光器,空间光调制器(SLM)像素数为 1920 pixel×1080 pixel,像素大小为 8 μm 。CCD 为高速阵列相机,帧频为 130 frame/s,像素数为 600 pixel×

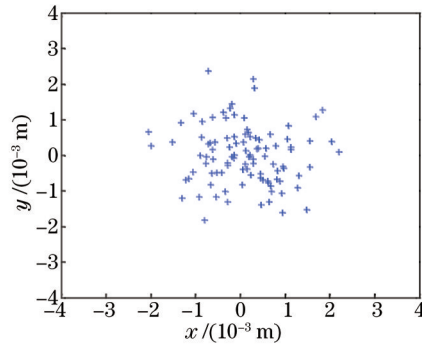


图6 环形艾里光束的质心分布

Fig.6 Centroid distribution of circular-Airy beams

512 pixel, 像素大小为 $4.4 \mu\text{m}$ 。在光路系统中, 透镜 L1 和 L2 构成 $\times 10$ 扩束镜, P 为线性起偏器, BS 为分光晶体, L3、L4 和 L5 为成像透镜, 焦距均为 1 m, 构成典型的 $4f$ 系统, D 为小孔光阑, CCD 相机置于透镜 L5 焦点处。在实验中通过给空间光调制器附加一定的偏转, 使环形光束离开 SLM 的衍射零级位置, 利用 $4f$ 系统和小孔光阑滤除掉零级光^[13], 在 CCD 上只采集环形艾里光束的光强分布。

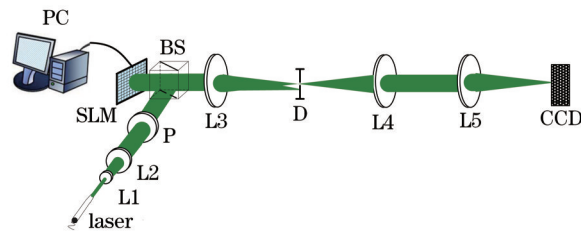


图7 实验装置图

Fig.7 Diagram of experimental setup

4.2 实验分析

图 8 为实验中由 CCD 相机采集到的环形艾里光束的光强分布, 其中图 8(a) 为焦点处的光强, 图 8(b) 为焦点后 10 mm 处的光强, 可以看出, 在焦点后环形艾里光束演变成类似 Bessel 光束的分布。

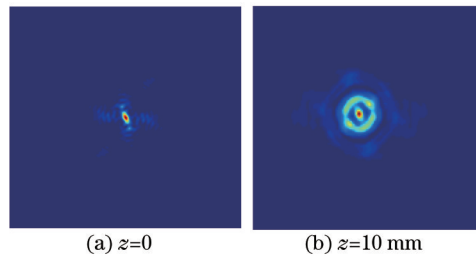


图8 环形艾里光束强度分布

Fig.8 Circular Airy beam intensity distributions

在实验室条件下对艾里光束在大气扰动中传播进行实验模拟, 采用环形艾里光束的相位屏叠加湍流相位屏的方法来实现。根据之前所述的数值模拟方法生成随机大气扰动相位, 选取参数如下: 大气扰动强度 $C_n^2 = 3 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, 大气扰动内尺度 $l_0 = 0.001 \text{ m}$, 外尺寸 $L_0 = 10 \text{ m}$, 网格数为 1920×1080 , 网格大小为 $8 \mu\text{m}$ 。

为了分析环形艾里光束的漂移特性, 将其与高斯光束和艾里光束进行比较。将之前计算的 60 个随机湍流相位分别与高斯光束、艾里光束和环形艾里光束的相位相叠加, 然后将生成的联合相位依次加载到空间光调制器上, 可以在透镜焦点处利用高速 CCD 相机采集到高斯光束、艾里光束和环形艾里光束受不同湍流影响的强度分布变化。根据三种光束自会聚点, 计算出光斑的质心, 与未加湍流相位的光束质心坐标进行对比, 计算出漂移量, 其结果如图 9 所示。在图 9(a)~(c) 中自上而下分别为高斯光束、艾里光束和环形艾里光束的漂移量。其中高斯光束的最大偏移量为 $78.34 \mu\text{m}$, 最小偏移量为 $7.95 \mu\text{m}$, 平均偏移量为 $36.54 \mu\text{m}$; 艾里光束的最大偏移量为 $30.27 \mu\text{m}$, 最小偏移量为 $3.02 \mu\text{m}$, 平均偏移量为 $16.77 \mu\text{m}$ 。环形艾里光束的最大偏移量为 $18.06 \mu\text{m}$, 最小偏移量为 0, 平均偏移量为 $9.81 \mu\text{m}$ 。从结果可以看出: 高斯光束的漂移量最大, 艾

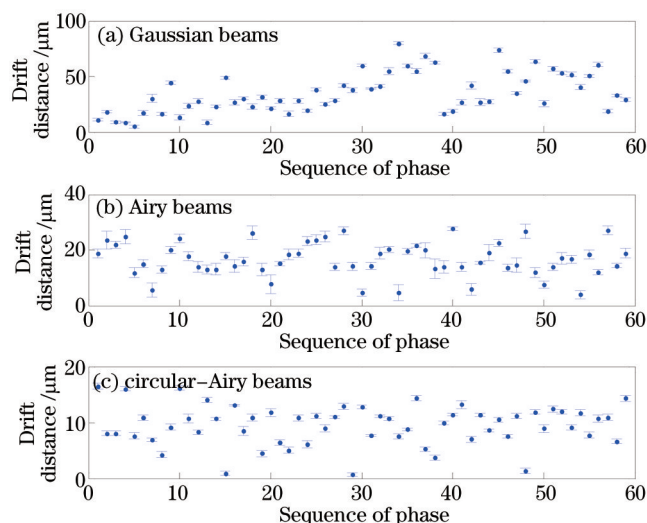


图9 高斯光束、艾里光束和环形艾里光束的漂移量

Fig.9 Drift distances of Gaussian beams, Airy beams and circular-Airy beams

里光束次之,而环形艾里光束最小。

进一步考虑不同大气扰动条件下随机湍流相位对漂移量的影响。设置 C_n^2 在 $1 \times 10^{-15} \sim 30 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 之间变化,分别测量不同大气扰动强度下环形艾里光束的平均漂移量。测量结果如图 10 所示。从图 10 可以看出,随着大气扰动强度的增大,环形艾里光束的漂移量变化不大,一直保持在 $8 \mu\text{m}$ 左右浮动。结合之前的结论,可以初步断定,环形艾里光束在湍流中传输时抗干扰能力强于高斯光束和艾里光束。

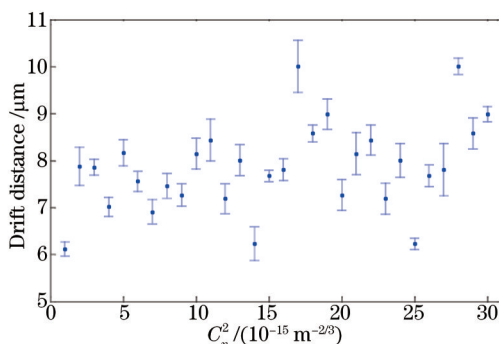


图 10 不同扰动强度下环形艾里光束的平均漂移量

Fig.10 Drift distance of circular-Airy beams with different turbulences

5 结 论

采用多层相位屏法和分步傅里叶算法相结合的方式分析了环形艾里光束在湍流大气中传输时的光斑漂移现象,通过理论仿真描述了环形艾里光束的光强分布传输演变过程。采用多层相位叠加技术,在仿真实验中验证了环形艾里光束在湍流中的漂移量小于高斯光束和艾里光束,并且漂移幅度受湍流强度影响较小。如果在远距离激光传输中采用环形艾里光束作为信息载体,可以有效降低光束漂移的困扰。

参 考 文 献

- 1 Chen Z G, Segev M, Christodoulides D N. Optical spatial solitons: Historical overview and recent advances[J]. Rep Prog Phys, 2012, 75(8): 086401.
- 2 Efremidis N K, Christodoulides D N. Abruptly autofocusing waves[J]. Opt Lett, 2010, 35(23): 4045-4047.
- 3 Zhou Wenming, Xu Jun, Zhang Qinghua, et al.. Numeric simulation of laser propagation in atmospheric turbulence[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(s1): 499-502.
- 周文明, 徐 军, 张清华, 等. 湍流大气激光传输数值模拟[J]. 中国激光, 2004, 31(s1): 499-502.
- 4 Shen Baoliang, Sun Jianfeng, Zhou Yu, et al.. Influence of time-varying atmospheric turbulence to facular orientation deviation in dynamic

- process[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0805004.
- 沈宝良, 孙剑锋, 周 煜, 等. 时变湍流对动态移动光斑定位精度的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0805004.
- 5 Berry M V, Balazs N L. Nonspreading wave packets[J]. Am J Phys, 1979, 47(3): 264–267.
- 6 Siviloglou G A, Christodoulides D N. Accelerating finite energy Airy beams[J]. Opt Lett, 2007, 32(8): 979–981.
- 7 Siviloglou G A, Christodoulides D N. Observation of accelerating Airy beam[J]. Phys Rev Lett, 2007, 99(21): 213901.
- 8 Jiang Yunfeng, Huang Kaikai, Lu Xuanhui. The optical Airy transform and its application in generating and controlling the Airy beam[J]. Opt Commun, 2012, 285(24): 4840–4843.
- 9 Chremmos I, Zhang P, Prakash J, *et al.*. Fourier-space generation of abruptly autofocusing beams and optical bottle beams[J]. Opt Lett, 2011, 36(18): 3675–3677.
- 10 Rao Ruizhong. Modern Atmospheric Optics[M]. Beijing: Science Press, 2012: 382–383.
- 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 382–383.
- 11 Johansson E M, Gavel D T. Simulation of stellar speckle imaging[C]. SPIE, 1994, 11: 372–383.
- 12 Liu Jun, Wu Pengli, Gao Ming. Wander and spreading of polarized and partially coherent laser propagation on slant path in turbulence atmospheric[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1013001.
- 刘 钧, 吴鹏利, 高 明. 偏振部分相干激光斜程湍流大气传输的漂移扩展[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1013001.
- 13 Wang Xiaozhang, Li Qi, Zhong Wen, *et al.*. Drift behavior of Airy beam in turbulence simulated by using a liquid crystal spatial light modulator[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1213001.
- 王晓章, 李 琦, 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.

栏目编辑: 史 敏