

液晶空间光调制器模拟艾里光束在湍流中的漂移

王晓章 李琦 钟文 王琪

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要 提出了一种多相位叠加的方法来模拟艾里光束在湍流大气中传输时的光斑质心漂移。通过将由 Kolmogorov 功率谱模型生成的随机相位屏与艾里立方相位图样叠加生成的联合相位膜片加载到空间光调制器, 模拟了湍流对艾里光束的影响。通过将艾里光束和高斯光束进行比较, 证实了艾里光束在湍流中传输时受扰动漂移量小于高斯光束。因此, 利用艾里光束作为信息载体在远距离传输时具有很好的抗干扰能力。

关键词 光栅; 空间光调制器; 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/CJL201340.1213001

Drift Behavior of Airy Beams in Turbulence Simulated by Using a Liquid Crystal Spatial Light Modulator

Wang Xiaozhang Li Qi Zhong Wen Wang Qi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract A method of superimposing multiple phase patterns in spatial light modulator to simulate the drift behavior of Airy beams in turbulence is proposed. Random phase screens which are generated by the Kolmogorov power spectrum model are superimposed with cubic phase patterns of Airy beams, and then a combined phase mask is generated. The combined phase mask is loaded into the spatial light modulator to simulate Airy beams in turbulence. Through comparing the drifts of Airy beams and related Gaussian beams, it is found that the drift distances of Airy beams are less than that of related Gaussian beams. Therefore, Airy beams as information carriers have a good anti-jamming capability in remote transmissions.

Key words gratings; spatial light modulator; Airy beams; turbulence; phase modulation

OCIS codes 050.2770; 230.6120; 010.7060; 060.5060

1 引言

艾里光束因为新奇的特性而在过去的几年里成为研究热点, 研究人员对其从理论预测到潜在应用都展开了大量研究^[1-5]。艾里光束在自由空间传播时, 若部分光瓣被遮挡, 在经过一段距离的传输后可以实现自我修复, 这一特性使其在扰动环境中传输时能保证强度分布轮廓受到的影响较小。另外, 艾里光束在自由空间传播时传输轨迹为抛物线, 选择合理的阵列参数可以使多个艾里光束在远场实现会聚叠加, 克服传统直线传播光束在远场接收平面因光斑过大而导致可探测能量过小的问题。因此艾里光束作为信息

载体在远距离传输领域具有重要的应用潜力。对于艾里光束在湍流中的传输特性研究近年来已有报道^[6-9], 不过还仅限于理论分析。相比于高斯光束, 艾里光束的闪烁和光束扩展较小的结论在理论上已被证实。然而, 在光束漂移方面, 艾里光束是否优于高斯光束, 目前还没有相关报道。本文对艾里光束受大气扰动产生的光束漂移问题展开研究, 以期解决高斯光束无法控制的光束漂移问题。

目前艾里光束的产生多采用液晶空间光调制器 (SLM) 调制高斯光束来实现, 这一器件也被用来模拟生成湍流的随机相位屏, 其中美国海军实验室采

收稿日期: 2013-06-19; **收到修改稿日期**: 2013-07-30

作者简介: 王晓章(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事艾里光束方面的研究。E-mail: xiaozhang_wang@aliyun.com

导师简介: 李琦(1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事激光雷达与太赫兹成像等方面的研究。

E-mail: liqi2013@hit.edu.cn

用单个或多个空间光调制器在实验室条件下完成了对湍流的模拟^[10-12]。对于光束在大气湍流中的传输特性研究,由于外场实验成本过高,研究人员多采用理论仿真或实验室模拟,在实验室条件下通常制作一个或多个随机相位板放置到传输光路中来模拟湍流。采用空间光调制器代替随机相位板,通过实时编程控制,可生成动态变化的湍流随机相位,对于实验研究光束在大气湍流中的时域变化具有重要意义。在本课题组之前发表的文章中^[13-14],将艾里光束的立方相位和偏转光栅相位叠加成一个相位膜片,实现了两个膜片的功能,既生成了艾里光束又使其偏转可控制;通过将立方相位、Dammann 光栅相位和偏转光栅三个相位膜片叠加实现了艾里光束的分束,并且偏转可控。这些结果证实了通过多相位叠加可以在一个相位膜片上实现多种功能。因此,本文采用立方相位叠加湍流随机相位的方法在实验室环境下对艾里光束受扰动产生的漂移现象进行分析。

2 湍流相位屏的生成

2.1 相位膜片的生成

理论上艾里光束所携带的能量是有限的,但在实际中是不可能的。因此通常在初始窗口给无限能量的艾里光束乘以一个指数衰减函数,表示为^[1]

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

式中 $A_i(\cdot)$ 为艾里函数, $A_i(s) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(iu^3/3 + isu) du$; s 为无量纲横向坐标; a 为衰减系数,取值为非负。对(1)式进行傅里叶变换可以获得艾里光束的频谱,表示为^[1]

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

有限能量艾里光束在真空中的场分布可以表示为^[1]

$$u(x, y, \xi) = A_i \left[\frac{x}{w_0} - \left(\frac{\xi}{2}\right)^2 + ia\xi \right] \cdot A_i \left[\frac{y}{w_0} - \left(\frac{\xi}{2}\right)^2 + ia\xi \right] \cdot \exp\left(a \frac{x}{w_0} - \frac{a\xi^2}{2}\right) \cdot \exp\left(a \frac{y}{w_0} - \frac{a\xi^2}{2}\right), \quad (3)$$

式中 ξ 为归一化传输距离; w_0 为艾里光束的主瓣大小。

由(2)式可知频域空间里艾里光束的空间相位分布为高斯形式和立方形式的乘积,因此在实验中

观察艾里光束通常是通过将高斯光束进行立方相位调制,再经过傅里叶透镜来实现。在本文中,立方分布相位的相位调制深度范围为 $-25\pi \sim 25\pi$, 实验时通常将此调制深度映射到 $[0, 2\pi]$ 空间。立方相位调制膜片如图 1 所示,由此相位膜片在实验中可以生成二维“L 型”分布的艾里光束。

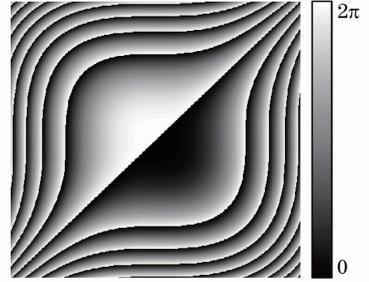


图 1 立方相位调制膜片

Fig. 1 Modulation mask of cubic phase

2.2 相位屏法模拟湍流

用数值模拟方法实现对大气湍流中光束传播影响的分析研究,关键之处在于相位屏的生成。目前多采用功率谱反演相位分布的方法来模拟相位屏^[15-17]。这一方法的基本思想是:生成一个复高斯随机数矩阵,借助符合 Kolmogorov 大气相位扰动的功率谱函数对其进行滤波,然后再进行逆傅里叶变换。

假定大气湍流各向同性,局部均匀,因此折射率功率密度函数仅采用 Tatarskii 谱,形式为^[8]

$$\Phi(k_r, z) = 0.033 C_n^2(z) k_r^{-11/3} \exp\left(-\frac{k_r^2}{k_m^2}\right), \quad (4)$$

式中 $C_n^2(z)$ 为传播路径上湍流强度的结构函数; k_r 为三维空间波数, $k_r = (k_x^2 + k_y^2)^{1/2}$, k_x, k_y 为空间波数; $k_m = 5.92/l_0$, l_0 为湍流内尺度。大气折射率起伏引起的满足 Kolmogorov 谱的功率谱函数具体形式可表示为^[18]

$$F_\Phi(k_r, z) = 2\pi k^2 \Delta z \Phi(k_r, z) \Delta k_x \cdot \Delta k_y, \quad (5)$$

式中 Δz 代表湍流层厚度; $\Delta k_x \cdot \Delta k_y$ 是控制相位屏方差的调节系数。

利用功率谱反演法模拟相位屏的整个过程可以表达为^[19]

$$\varphi(x, y) = \sum_{k_x} \sum_{k_y} h(k_x, k_y) \sqrt{F_\Phi(k_x, k_y)} \cdot \exp[i(k_x x + k_y y)] \Delta k_x \cdot \Delta k_y, \quad (6)$$

式中 $\varphi(x, y)$ 表示最终相位屏所模拟的大气扰动相位; $h(k_x, k_y)$ 表示频域内的零均值单位方差的 Hermitian 复高斯随机变量。将(4)、(5)式代入(6)式得到任意距离处的湍流随机相位分布为

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, z + \Delta z) = & 0.455k \cdot \Delta z^{1/2} \cdot C_n^2(z) \cdot \\ & \sum_{k_x} \sum_{k_y} h(k_x, k_y) \cdot k_r^{-11/6} \cdot \\ \exp[i(k_x x + k_y y + k_r/k_m)] \cdot & (\Delta k_x \cdot \Delta k_y)^{3/2}. \end{aligned} \quad (7)$$

光束在大气湍流中传输的数值模拟,其中一个核心问题就是构造合适的相位屏,以准确反映湍流折射率变化特性。由于在仿真计算中,频谱是离散的,最低频率受限于采样率,所以在构造相位屏时大气湍流的低频部分会消失,因此需对相位屏加低频的修正。

湍流介质中光束的波结构函数和湍流折射率的结构函数具有相同的标度特性,而空间相关长度是表征波结构函数的位移参量,因此在表征全程大气湍流强度和光传播相位校正技术中得到广泛应用。在目前数值模拟大气湍流的诸多研究中,相干长度为^[20]

$$r_0 = 0.185 \left[\frac{\lambda^2}{z + \Delta z} \int_z^{z + \Delta z} C_n^2(\xi) d\xi \right]. \quad (8)$$

由于大气湍流的统计特性可用相位结构函数来

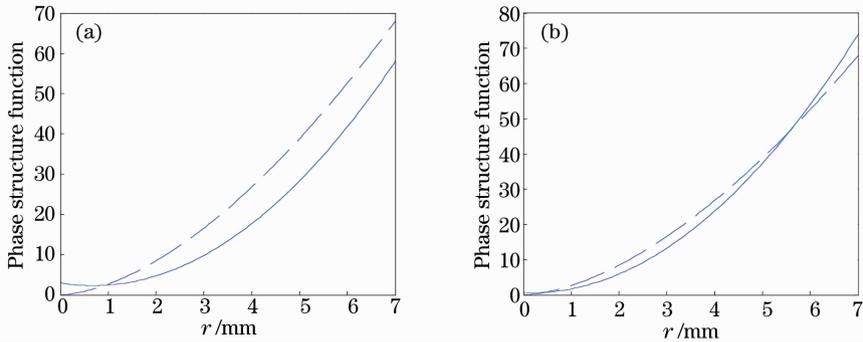


图2 相位结构函数。(a) 单层相位屏；(b) 三层相位屏

Fig. 2 Phase structure functions. (a) Single phase screen; (b) three phase screens

2.3 相位膜片与随机相位屏叠加

在实验室条件下对艾里光束在湍流扰动中传播进行实验模拟,本文采用立方相位叠加随机相位屏的方法来实现。首先根据之前所述的数值模拟方法生成随机湍流扰动相位,选取参数为:湍流强度

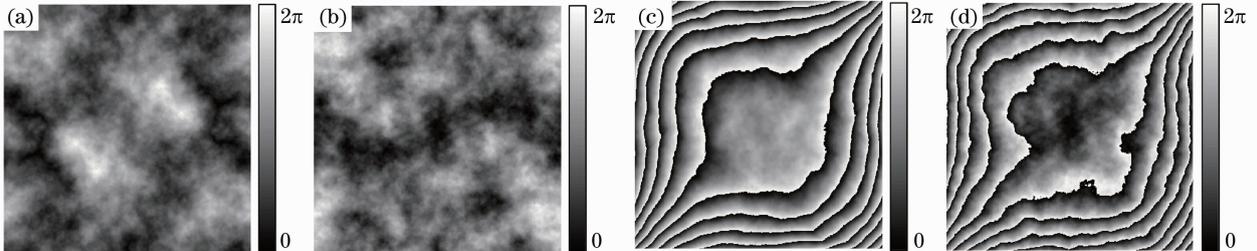


图3 相位分布。(a) 单层屏；(b) 三层叠加屏；(c) 立方相位与单层屏叠加；(d) 立方相位与三层屏叠加

Fig. 3 Phase distributions. (a) Single screen; (b) three screens; (c) cubic phase superimposed with a single screen; (d) cubic phase superimposed with three screens

描述,因此,相位结构函数有时会被作为验证湍流随机相位屏好坏的判断标准。相位结构函数定义为^[21]

$$D(r) = \langle [\varphi(x+r) - \varphi(r)]^2 \rangle, \quad (9)$$

式中 r 为相位屏上的坐标,表示目标采样点与已知采样点之间的标量距离; x 为已知采样点的位置坐标; $\varphi(r)$ 表示相位屏中某一位置的扰动相位; $\langle \cdot \rangle$ 表示在函数定义域内求平均。与 Kolmogorov 谱对应的结构函数的定义式^[23]为 $D(r) = 6.88 (r/r_0)^{5/3}$ 。这一结构函数目前常被作为与 Kolmogorov 大气湍流功率谱相对应的相位结构函数的理论值,验证模拟相位屏的好坏通常是将根据模拟随机相位计算的相位结构函数与此理论值进行比较。图2为根据之前模型计算的相位结构函数和理论值的比较结果,图中虚线为理论值,实线为计算得到随机相位的结构函数。对单层相位屏和三层相位屏进行比较发现,后者的相位结构函数更接近于理论值,因此,在实验中将采用三层相位屏叠加来模拟湍流扰动相位。

$C_n^2 = 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$,湍流内尺度 $l_0 = 0.001 \text{ m}$,网格数为 512×512 ,网格大小为 $15 \mu\text{m}$,相位屏大小为 $7.68 \text{ mm} \times 7.68 \text{ mm}$ 。由此计算的某单层屏随机相位分布如图3(a)所示,某三层屏叠加后的相位分布如图3(b)所示。利用这两个相位分布生成相位膜

片加载到空间光调制器,可以实现对高斯光束在湍流中传输的模拟^[10]。图 3(c)、(d)为图 3(a)、(b)分别与图 1 所示立方相位叠加后的分布图样,将由此生成的相位膜片加载到空间光调制器可用于模拟艾里光束在湍流扰动中的传输。

3 实 验

3.1 实验装置

实验装置如图 4 所示。实验中采用 BNS 公司型号为 HSP512-1550 nm 的液晶空间光调制器实现相位膜片加载,像素数为 512 pixel×512 pixel,像素大小为 15 μm。光源为工作波长在 632.8 nm 的 He-Ne 激光器,光源产生的高斯光束经过透镜 L1 和 L2 扩束后,由偏振片 P 旋转其偏振方向,使之平行于液晶的光轴。经 SLM 反射后的光束通过透镜 L3 和 L4 构成的 4f 系统,由透镜 L5 聚焦到置于焦点处的 CCD 相机。其中 L3、L4 和 L5 的焦距相等,都为 100 mm。CCD 相机为 Spiricon 公司型号为 USBSP620U 的光束质量分析仪,像素数为 1600 pixel×1200 pixel,像素大小为 4.4 μm。在实验中通过给空间光调制器附加一定的偏转,使艾里光束离开器件的零点位置,在 4f 系统中用空间光阑 D 滤除掉零级光,在 CCD 上只采

集艾里光束的强度分布。

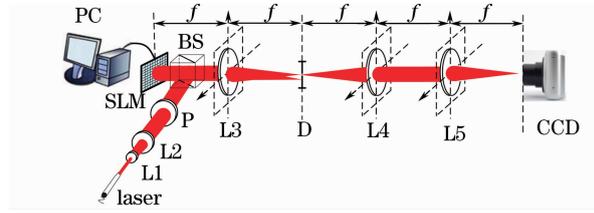


图 4 实验装置图

Fig. 4 Experimental setup

3.2 实验结果与分析

为了分析艾里光束在湍流中的光束质心漂移行为,在实验中引入一束参考光。这一参考光由同一 He-Ne 激光器发出,经过扩束入射到空间光调制器并被反射,经过 4f 系统和成像傅里叶透镜最终被 CCD 接收。不同之处是在被空间光调制器反射时除了附加湍流相位之外没有加入其他任何调制。理论上反射后的光束应该是高斯光束,但是由于空间光调制器反射衬底平面不平整以及液晶盒厚度不均匀,造成光束的能量不再满足高斯分布^[22],而称其为类高斯光束。无湍流时类高斯光束的强度分布如图 5(a)所示,图 5(b)为空间光调制器加载单层随机相位屏时的强度分布,图 5(c)为加载叠加的三层随机相位屏后的强度分布。

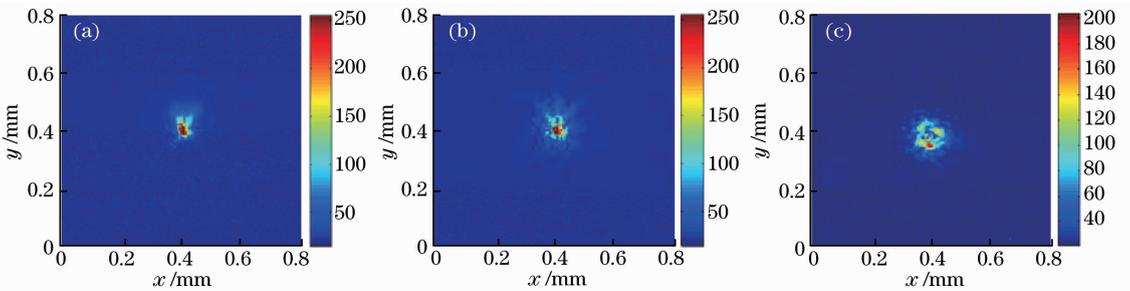


图 5 (a) 无湍流时, (b) 叠加单层相位屏后和 (c) 叠加三层屏后类高斯光束的强度分布

Fig. 5 Intensity distributions of related Gaussian beams (a) without turbulence, (b) with a single phase screen and (c) with three phase screens

将具有图 1、图 3(c)和图 3(d)所示的相位分布的相位膜片加载到空间光调制器,得到的艾里光束

强度分布如图 6 所示,其中图 6(a)为无湍流时的情况,图 6(b)为立方相位与单层屏叠加的情况,

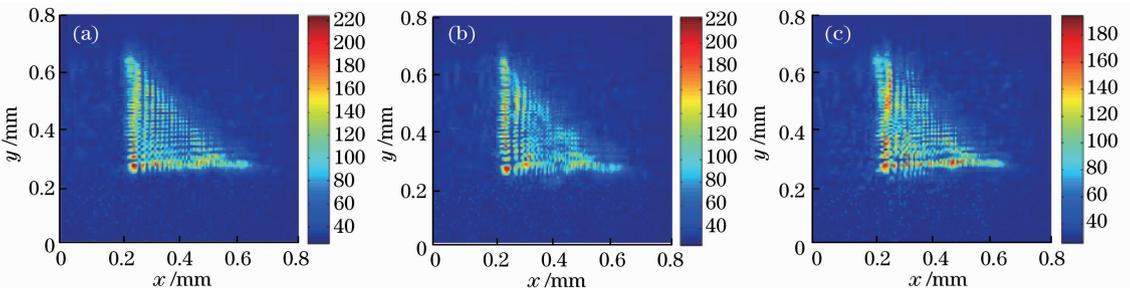


图 6 (a) 无湍流时, (b) 叠加单层相位屏后和 (c) 叠加三层屏后艾里光束的强度分布

Fig. 6 Intensity distributions of Airy beams (a) without turbulence, (b) with a single phase screen and (c) with three phase screens

图 6(c) 为立方相位与三层随机相位屏叠加后的情况。实验中观察发现,图 6(b)、(c) 中所示的艾里光束依然具有横向加速特性,验证了叠加相位屏并未改变艾里光束的基本性质。

激光束经湍流大气传输时经常存在漂移现象,即在垂直于光传播方向的平面内光束中心位置会发生随机移动,这一现象会影响激光应用系统的稳定性和可靠性。光斑质心定义为^[23-24]

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i |u(x_i, x_j)|^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |u(x_i, x_j)|^2}, \quad (10)$$

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_j |u(x_i, x_j)|^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |u(x_i, x_j)|^2}. \quad (11)$$

为了分析类高斯光束和艾里光束在湍流中的光束质心漂移行为,将无湍流时类高斯光束和艾里光束的质心坐标作为参考点;利用之前所述方法生成一系列随机相位,然后随机将其中三个相位屏叠加,产生一组供实验调用的相位屏,对其进行编号,并依次调用来完成对类高斯光束和艾里光束的调制,以便对同一湍流扰动下类高斯光束和艾里光束的漂移量进行比较。

首先分析同一湍流强度条件下光束漂移行为,选择湍流强度 C_n^2 的值为 $2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 。实验中生成 31 个叠加的随机相位屏,依次将这一组随机相位屏分别加载到空间光调制器,其间空间光调制器不再附加其他调制;然后在透镜焦点处利用 CCD 相机分别采集参考光受不同相位屏扰动后的强度分布,从而获得 31 个随机扰动情况下类高斯光束质心坐标的变化。将未加随机相位时的光束质心坐标作为基准,可以获得图 7 所示的参考光束(即类高斯光

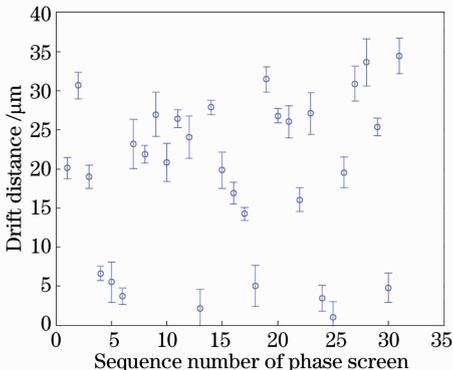


图 7 类高斯光束受扰动影响的漂移量

Fig. 7 Drift distances of related Gaussian beams

束)受扰动影响的漂移量。从图中可以看出,这一组随机相位屏造成高斯光束的漂移是随机的,其中最大漂移量为 $35.34 \mu\text{m}$,最小漂移量为 $0.89 \mu\text{m}$,平均漂移量为 $19.17 \mu\text{m}$ 。

将这一组随机相位按照之前次序分别与艾里相位膜片相叠加,生成复合相位膜片,并将之依次加载到空间光调制器,即可完成对艾里光束在扰动环境中传输的实验模拟,实验结果如图 8 所示。因为湍流相位是随机的,因此实验中测得的艾里光束的漂移量也是随机分布的,其中最大偏移量为 $26.78 \mu\text{m}$,最小偏移量为 $3.11 \mu\text{m}$,综合 31 组结果,艾里光束的平均偏移量为 $9.97 \mu\text{m}$ 。与图 7 中高斯光束的结果相比较,可以知道艾里光束的平均偏移量小于高斯光束的平均偏移量。

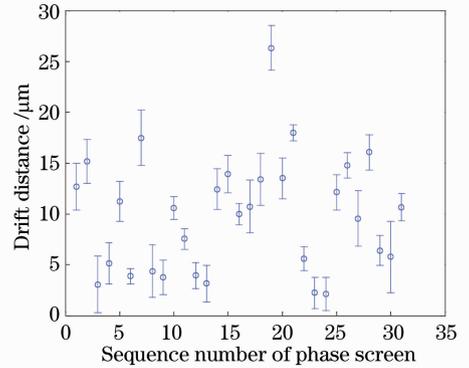


图 8 艾里光束受扰动影响的漂移量

Fig. 8 Drift distances of Airy beams

进一步分析不同湍流条件下随机相位屏对高斯光束和艾里光束的影响。设置 C_n^2 的取值范围为 $2 \times 10^{-15} \sim 2 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,分别测量不同湍流强度下艾里光束和类高斯光束的平均漂移量,测量结果如图 9 所示。从图中可以看出,随着湍流强度的增

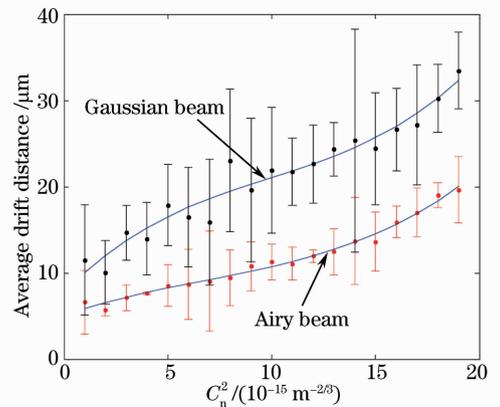


图 9 不同湍流强度下艾里光束和类高斯光束的平均漂移量

Fig. 9 Average drift distances of Airy beam and Gaussian beam with different turbulence intensities

大,类高斯光束和艾里光束的漂移量都逐渐增大,而类高斯光束的漂移量增加幅度大于艾里光束。当 C_n^2 为 $2 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 时类高斯光束的平均漂移量为 $33.59 \mu\text{m}$,艾里光束的平均偏移量为 $19.66 \mu\text{m}$ 。

4 结 论

采用多相位膜片叠加的方法分析了艾里光束和类高斯光束在湍流大气中传输时的光斑漂移现象。多相位膜片叠加技术是将多个不同功能的相位膜片叠加生成一个联合相位膜片,该联合相位膜片能完好地保存原先每个独立相位膜片的功能。通过将艾里光束和类高斯光束进行比较,实验上证实了艾里光束在湍流中的漂移量小于类高斯光束;通过不同湍流强度下艾里光束和类高斯光束的漂移量比较,发现艾里光束和类高斯光束的漂移量都随湍流强度的增加而增加,而艾里光束漂移量增加的幅度小于类高斯光束,因此在远距离激光传输中采用艾里光束作为信息载体,可以有效降低光束漂移。另外,相比于传统的多相位板模拟技术,多相位膜片叠加方法使得系统更加简单,而且湍流随机相位由计算机生成,对于进一步研究艾里光束在动态大气湍流中的时域模拟具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 G A Siviloglou, D N Christodoulides. Observation of accelerating Airy beam[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, 99(21): 213901.
- 2 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.
- 3 T Ellenbogen, N Voloch-Bloch, A Ganany-Padowicz, *et al.*. Nonlinear generation and manipulation of Airy beams[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(7): 395–398.
- 4 J Baumgartl, M Mzailu, K Dholakia. Optically mediated particle clearing using Airy wave packets[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(11): 675–678.
- 5 D Abdollahpour, S Suntsov, D G Papazoglou, *et al.*. Spatiotemporal Airy light bullets in the linear and nonlinear regimes[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 105(25): 253901.
- 6 Yalong Gu, Greg Hbur. Scintillation of Airy beam arrays in atmospheric turbulence [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(20): 3456–3458.
- 7 Halil T Eyyuboglu. Scintillation behavior of Airy beam [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 47: 232–236.
- 8 Xiuxiang Chu. Evolution of an Airy beam in turbulence[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(14): 2701–2703.
- 9 Rumao Tao, Lei Si, Yanxing Ma, *et al.*. Average spreading of finite energy Airy beams in non-Kolmogorov turbulence [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2013, 51(4): 488–492.
- 10 F Santiago, C O Font, C C Wilcox, *et al.*. Study on the

- implementation of spatial light modulator liquid crystal device atmospheric simulator for short wavelength infrared applications [C]. *SPIE*, 2011, 7923: 79230R.
- 11 J D Schmidt, M E Goda, B D Duncan. Emulating bulk turbulence with a liquid crystal spatial light modulator [C]. *SPIE*, 2006, 6306: 63060O.
- 12 P Jacquemin, B Fernandez, C C Wilcox, *et al.*. Deep Horizontal Atmospheric Turbulence Modeling and Simulation with a Liquid Crystal Spatial Light Modulator[R]. *NTIS*, 2012.
- 13 Xiaozhang Wang, Qi Li, Qi Wang. Arbitrary scanning of the Airy beams using additional phase grating with cubic phase mask [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(28): 6726–6731.
- 14 Xiaozhang Wang, Qi Li, Zhipeng Xiong, *et al.*. Generation and scanning of Airy beams array by combining multiphase patterns [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(13): 3039–3047.
- 15 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.
- 16 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.
- 17 Wang Sanhong, Liang Yonghui, Long Xuejun, *et al.*. Multilevel wavefront correction technique based on stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(5): 1091–1096.
王三宏, 梁永辉, 龙学军, 等. 基于随机并行梯度下降算法的多级波前校正技术 [J]. *中国激光*, 2009, 36(5): 1091–1096.
- 18 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.
- 19 E M Johansson, D T Gavel. Simulation of stellar speckle imaging [C]. *SPIE*, 1994, 2200: 372–383.
- 20 J M Martin, Stanley M Flatte. Intensity images and statistics from numerical simulation of wave propagation in 3-D random media [J]. *Appl Opt*, 1988, 27(11): 2111–2126.
- 21 C Paterson. Atmospheric turbulence and orbital angular momentum of single photons for optical communication [J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 94(15): 153901.
- 22 Xinghua Wang, Bin Wang, P J Bos, *et al.*. Modeling and performance limits of a large aperture high-resolution wavefront control system based on a liquid crystal spatial light modulator [J]. *Opt Eng*, 2007, 46(4): 044001.
- 23 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.
- 24 Liu Yunqing, Jiang Huilin, Tong Shoufeng. Study on stabilizational tracking technology for atmospheric laser communication system [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(5): 0505005.
刘云清, 姜会林, 佟高峰. 大气激光通信中稳定跟踪器件及算法研究 [J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0505005.

栏目编辑: 史 敏