

2维Airy光束阵列强度的调控技术研究

张俊杰, 安岩, 董科研, 高亮, 李响, 张紫浩, 陈亚楠

Research on the technique of regulating the intensity of 2-D Airy beam array

引用本文:

张俊杰, 安岩, 董科研, 高亮, 李响, 张紫浩, 陈亚楠. 2维Airy光束阵列强度的调控技术研究[J]. [激光技术](#), 2024, 48(1): 97-104.

ZHANG Junjie, AN Yan, DONG Keyan, et al. Research on the technique of regulating the intensity of 2-D Airy beam array[J]. [Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays](#), 2024, 48(1): 97-104.

您可能感兴趣的其他文章

1. 艾里涡旋光束通过负折射率介质的传输特性

引用本文: 许森东. 艾里涡旋光束通过负折射率介质的传输特性[J]. [激光技术](#), 2022, 46(6): 850-854.

2. EEMGSM光束在各向异性湍流中的光束质量因子研究

引用本文: 束杰, 屈军. EEMGSM光束在各向异性湍流中的光束质量因子研究[J]. [激光技术](#), 2019, 43(6): 834-840.

3. 光纤激光非相干合成效果分析

引用本文: 贺也洹, 张恩华, 王志海, 等. 光纤激光非相干合成效果分析[J]. [激光技术](#), 2019, 43(6): 829-833.

4. 基于高斯光束的飞秒激光光束质量检测技术

引用本文: 艾尼江·阿塔伍拉, 阿布都热苏力·阿不都热西提. 基于高斯光束的飞秒激光光束质量检测技术[J]. [激光技术](#), 2019, 43(6): 846-849.

5. 基于数字微镜阵列的平顶光束空间整形

引用本文: 娄艳阳, 郑贤良, 张世超, 等. 基于数字微镜阵列的平顶光束空间整形[J]. [激光技术](#), 2016, 40(6): 916-920.

文章编号: 1001-3806(2024)01-0097-08

2 维 Airy 光束阵列强度的调控技术研究

张俊杰¹, 安岩^{1,2*}, 董科研^{1,2}, 高亮^{1,2}, 李响^{1,2}, 张紫浩³, 陈亚楠³

(1. 长春理工大学光电工程学院, 长春 130022, 中国; 2. 长春理工大学空间光电技术研究所, 长春 130022, 中国; 3. 电磁空间安全国家重点实验室, 天津 300308, 中国)

摘要: 为了控制 2-D Airy 光束阵列在焦点的强度, 利用高斯光束在频域移动可以进行调控的原理, 对其在大气湍流中的效果进行了仿真。结果表明, 通过高斯光束在频域的位移, 实现了 2-D Airy 光束阵列焦点处强度从 0.85 增强到 1.1, 且操作灵活方便, 不需要通过重复编码相位图增加光束数目就可增强光束在焦点的强度; 在中等湍流强度下, 光束强度可从 0.85 增强到 1.03。该研究对激光在大气中抵抗大气湍流、提高激光通信的质量, 具有一定的参考意义。

关键词: 物理光学; Airy 光束; 强度调控; 光束阵列

中图分类号: TN929.12 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.01.016

Research on the technique of regulating the intensity of 2-D Airy beam array

ZHANG Junjie¹, AN Yan^{1,2*}, DONG Keyan^{1,2}, GAO Liang^{1,2}, LI Xiang^{1,2}, ZHANG Zihao³, CHEN Yanan³

(1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Institute of Space Photoelectric Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 3. National Key Laboratory of Electromagnetic Space Security, Tianjin 300308, China)

Abstract: In order to control the intensity of the 2-D Airy beam array at the focal point, a simulation study was conducted using the principle of modulation of the Gaussian beam moving in the frequency domain. The results show that the intensity enhancement from 0.85 to 1.1 at the focal point of the 2-D Airy beam array is achieved by shifting the Gaussian beam in the frequency domain, and the operation is flexible and convenient without increasing the number of beams by repeatedly encoding the phase diaphragm to enhance the intensity of the beam at the focal point, and its effect in atmospheric turbulence is simulated, beam intensity enhancement from 0.85 to 1.03 at moderate turbulence intensity. The modulation is of research significance for the laser to resist atmospheric turbulence in the atmosphere and improve the quality of laser communication.

Key words: physical optics; Airy beam; intensity modulation; beam array

0 引 言

随着有限能量 Airy 光束的生成, 因其具有无衍射性、自加速性、自愈性的特点^[1-3], 引起了研究人员的广泛兴趣。近年来, 在 Airy 光束的传输轨迹、光束强度、无衍射传输距离、光束特性、光束生成方法等方面^[4-11]有了进一步的研究成果, 其中具有自聚焦特性 Airy 光束的实验实现^[12-13]推进了 Airy 光束在强度方面的研究。自聚焦 Airy 光束在传播过程中强度几乎保持不变, 但在接近焦点 (Airy 光束自聚焦强度最大的位置) 时峰值强度可突然增加几个数量级。Airy 光束阵

列^[14]是自聚焦光束的一类, 同样具有强度突增的特性, 合成方式简单高效, 对其强度方面的研究也是科研人员研究的重点方向。

2010 年, HU 等人^[15]通过仿真和实验证明高斯光束在频域的位移, 可以实现对 2-D Airy 光束峰值强度位置的调控, 但对 Airy 光束阵列强度的调控需要进一步研究。2013 年, ZHANG 等人^[14]在实验上实现了 1-D Airy 光束阵列合成自聚焦光束, 实现了光束强度在焦点的扩展。2014 年, CHEN 等人^[16]研究发现横向尺度因子可以控制 Airy 光束阵列自聚焦位置处强度的大小。2016 年, EZ-ZARIY 等人^[17]推导了高斯光束阵列, 生成了 Airy 光束阵列的表达式, 并仿真实现了高斯光束阵列到 Airy 光束阵列的转换。2018 年, WU 等人^[18]通过控制横向尺度因子实现了 2-D Airy 光束阵列自聚焦位置的移动。2019 年, DAFNE 等人^[19]通过仿

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U2141231); 吉林省科技厅重点研发项目 (20210201022GX); 吉林省教育厅产业化研究项目 (JJKH20220752CY)

* 通信作者: anyan_7@126.com

收稿日期: 2022-12-19; 修回日期: 2023-03-22

真和实验证明:施加线性和二次扰动因子,可以对 Airy 光束阵列能量分布实现控制。2022 年, XU 等人^[20]通过对衰减因子、缩放因子的研究,实现了对自聚焦 Airy 光束强度、聚焦位置等的控制。以上研究表明,通过对光束或相位图不同参数的控制,实现 Airy 光束阵列强度的控制,在仿真或实验过程中,需要通过软件实时编码控制光束参数或相位图参数,在液晶空间光调制器上实时更换相位图,过程复杂,并且对于一定焦点处 Airy 光束阵列强度的增强还需要进一步的研究。

本文作者研究了高斯光束在频域上的移动对 2-D Airy 光束阵列焦点处强度的控制。首先介绍了 Airy 光束阵列的研究背景、意义;然后理论分析了高斯光束对 2-D Airy 光束阵列焦点处强度调控的原理;最后分别对 2-D Airy 光束峰值强度位置的调控、光束阵列的初始光强以及自聚焦过程、2-D Airy 光束阵列焦点处强度的增强进行了数值仿真和讨论。该光束阵列调控方法操作简单,在激光光束能量的扩展,以及激光通信信号的稳定、激光医疗等方面具有一定的研究价值。

1 理论分析

2-D Airy 光束阵列如图 1 所示。由 4 个单独的 2-D Airy 光束组成,其中间隔距离 $2c$ ^[21]表示 2-D Airy 光束阵列的光束间距。

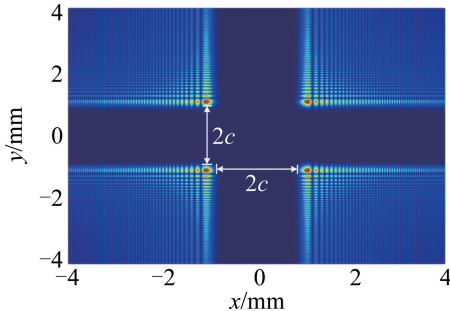


图 1 2-D Airy 光束阵列示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 2-D Airy beam array

以点 (c, c) 为中心的 2-D Airy 光束的有限能量函数方程为^[1]:

$$\begin{aligned} \phi(s_x, s_y, \xi) &= \phi(s_x, \xi) \times \phi(s_y, \xi) = \\ &A \left[s_x - \left(\frac{\xi}{2} \right)^2 + i\alpha\xi \right] \times A \left[s_y - \left(\frac{\xi}{2} \right)^2 + i\alpha\xi \right] \times \\ &\exp \left[\alpha s_x - \frac{\alpha\xi^2}{2} - i \left(\frac{\xi^3}{12} \right) + i \left(\frac{\alpha^2 \xi}{2} \right) + i \left(\frac{s_x \xi}{2} \right) + \right. \\ &\left. \alpha s_y - \frac{\alpha\xi^2}{2} - i \left(\frac{\xi^3}{12} \right) + i \left(\frac{\alpha^2 \xi}{2} \right) + i \left(\frac{s_y \xi}{2} \right) \right] \quad (1) \end{aligned}$$

式中: $\phi(\cdot)$ 为电场包络; $A[\cdot]$ 为 Airy 函数; $s_x = (x+c)/x_0$ 和 $s_y = (y+c)/y_0$ 为无量纲的横向坐标; x_0 和 y_0 为横向

尺度因子; $\xi = z/(kx_0^2)$ 为归一化的传输距离, $k = 2\pi/\lambda$ 为波束, λ 为真空中波长; α 为衰减因子, 且 $0 < \alpha \ll 1$ 。

因此,根据式(1),基于旋转矩阵理论^[22]生成 2-D Airy 光束阵列,其函数方程为:

$$\begin{aligned} \Phi(s_x, s_y, \xi) &= \phi(s_x, s_y, \xi) + \phi(s_x, -s_y, \xi) + \\ &\phi(-s_x, s_y, \xi) + \phi(-s_x, -s_y, \xi) \quad (2) \end{aligned}$$

通过高斯光束在频域的位移原理,实现 2-D Airy 光束阵列焦点处强度的调控。为了便于理解高斯光束位移的理论,首先考虑 1-D Airy 光束生成高斯光束的位移,根据式(1)对于 1-D 有限能量 Airy 光束在频域的傅里叶谱^[1]可以表示为: $\exp(-\alpha\omega^2) \exp[i(\omega^3 - 3\alpha^2\omega - i\alpha^3)/3]$, 其中 ω 是频域归一化的波数。在频域上移动高斯光束,其傅里叶谱变为 $\exp[-\alpha(\omega - \omega_c)^2] \times \exp[i(\omega^3 - 3\alpha^2\omega - i\alpha^3)/3]$, 而 ω_c 表示高斯光束在频域的归一化位移。因此产生的 1-D 有限能量 Airy 光束新的电场包络 $\phi_1(s_x, z)$ ^[15]为:

$$\begin{aligned} \phi_1(s_x, \xi) &= f(s_x, \xi) A \left[s_x - \left(\frac{\xi}{2} \right)^2 + \right. \\ &\left. i\alpha(\xi - 2\omega_c) \right] \exp(-\alpha\omega_c^2 - i2\alpha^2\omega_c) \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(s_x, \xi) &= \exp \left[\alpha s_x + i s_x \frac{\xi}{2} + \right. \\ &\left. \left(i \frac{\alpha^2}{2} + \alpha\omega_c \right) \xi + \left(\frac{-\alpha}{2} \right) \xi^2 - i \frac{\xi^3}{12} \right] \quad (4) \end{aligned}$$

从式(3)可以看出,1-D 有限能量 Airy 光束新的峰值强度位置为 $\xi - 2\omega_c = 0$, 当 $\omega_c = 0$ 时,在 $z = 0$ 处光强最大;当高斯光束的位移 $\omega_c \neq 0$ 时,对峰值强度的位置产生变化,所以在频域移动高斯光束对 1-D Airy 光束的强度分布会产生影响。

类似的,2-D 情况下,高斯光束位移后的 2-D 有限能量 Airy 光束新的电场包络为 $\phi_1(s_x, z) \times \phi_1(s_y, z)$, 高斯光束在 (x, y) 方向的位移表示为 $(D_{G,x}, D_{G,y})$, 其中 $D_{G,x}$ 和 $D_{G,y}$ 分别为高斯光束在 x 和 y 方向的归一化位移。2-D Airy 光束峰值光束强度位置为 $\xi - \sqrt{2}D_G = 0$, 同样的高斯光束的位移也会影响 2-D Airy 光束强度分布。根据式(2)以及式(3),高斯光束位移后的新 2-D Airy 光束阵列函数为:

$$\begin{aligned} \Phi_1(s_x, s_y, \xi) &= \phi_1(s_x, s_y, \xi) + \phi_1(s_x, -s_y, \xi) + \\ &\phi_1(-s_x, s_y, \xi) + \phi_1(-s_x, -s_y, \xi) \quad (5) \end{aligned}$$

2 数值仿真

2.1 2-D Airy 光束峰值强度的调控

典型的 Airy 光束生成系统如图 2 所示。高斯光

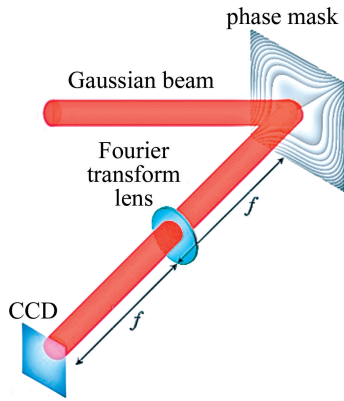


图 2 Airy 光束生成系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Airy beam generation system

束首先由液晶空间光调制器加载的相位图调制, 然后通过傅里叶变换透镜, 焦距为 f , 在傅里叶透镜的后焦面上生成 Airy 光束。通常高斯光束、相位图和傅里叶透镜被设置为沿 z 轴同轴, 在傅里叶透镜的后焦面放置 CCD 相机, 用于记录 Airy 光束的强度模式。如图 3 所示, 可通过在液晶空间光调制器上加载 2-D Airy 光束的相位图, 在傅里叶透镜的后焦面上生成 2-D Airy

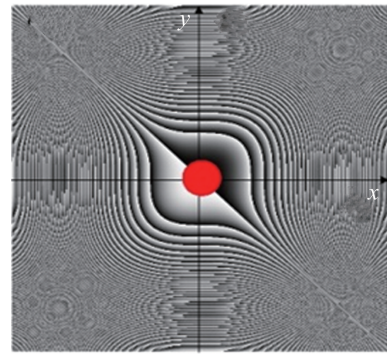


图 3 单个 2-D Airy 光束相位图及高斯光束在频域的位置示意图
Fig. 3 2-D Airy beam phase diagram and the position of Gaussian beam in frequency domain

光束。图中红点表示高斯光束的位置。

根据式 (3) 和式 (4), 对高斯光束在频域位移对 2-D Airy 光束强度的影响进行仿真分析。图 4 为不移动高斯光束 ($D_{G,x} = D_{G,y} = 0$), 2-D Airy 光束分别在 z 为 0 mm、125 mm、190 mm、250 mm 时, 光束强度仿真以及对应的 3-D 图。仿真参数设定为: 高斯光束波长 $\lambda = 1550$ nm, $x_0 = 80$ μ m, $y_0 = 80$ μ m, $\alpha = 0.01$, $c = 0$ mm。

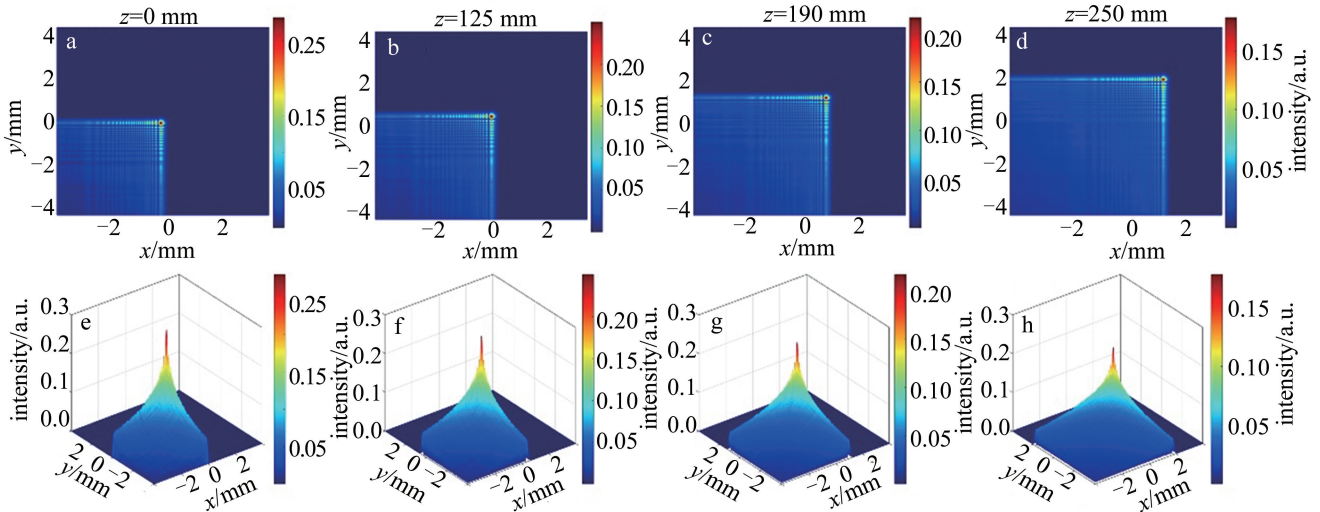


图 4 高斯光束无位移时的 2-D Airy 光束强度

Fig. 4 Intensity of 2-D Airy beam without Gaussian beam displacement

如图 4a 所示, 当在频域不移动高斯光束 ($D_{G,x} = D_{G,y} = 0$) 时, $z = 0$ mm 处无衍射峰值光束强度为 0.28, 此时 2-D Airy 光束强度最强; 如图 4b 所示, 2-D Airy 光束传播到 $z = 125$ mm 时, 2-D Airy 光束强度为 0.25, 光束强度衰减约 10%, 2-D Airy 光束仍可无衍射传播一段距离; 如图 4c 所示, 2-D Airy 光束传播到 $z = 190$ mm 时, 2-D Airy 光束强度为 0.21, 光束强度衰减约 25%, 此时光束强度衰减超过无衍射传播距离的 18%, 对于在激光通信应用研究中, 光束强度受大气湍流影响^[23-27], 接收端光束强度减弱, 影响信号的接收;

如图 4d 所示, 2-D Airy 光束传播到 $z = 250$ mm 时, 2-D Airy 光束强度为 0.17, 相较于图 4a, 此时光束强度衰减了约 40%。从图 4e~图 4h 的 3-D 仿真图可以明显地看出, 随着传播距离的增加, 2-D Airy 光束强度在衰减。通过对高斯光束在频域的位移仿真了 2-D Airy 光束峰值强度位置的变化, 在激光通信应用中, 可以在一定距离内使峰值光束强度传播到接收端。

图 5 为移动高斯光束 ($D_{G,x} = D_{G,y} = 4$), 2-D Airy 光束分别在 z 为 0 mm、125 mm、190 mm 和 250 mm 时, 光束强度仿真以及对应的 3-D 图。将初始光强衰减 18%

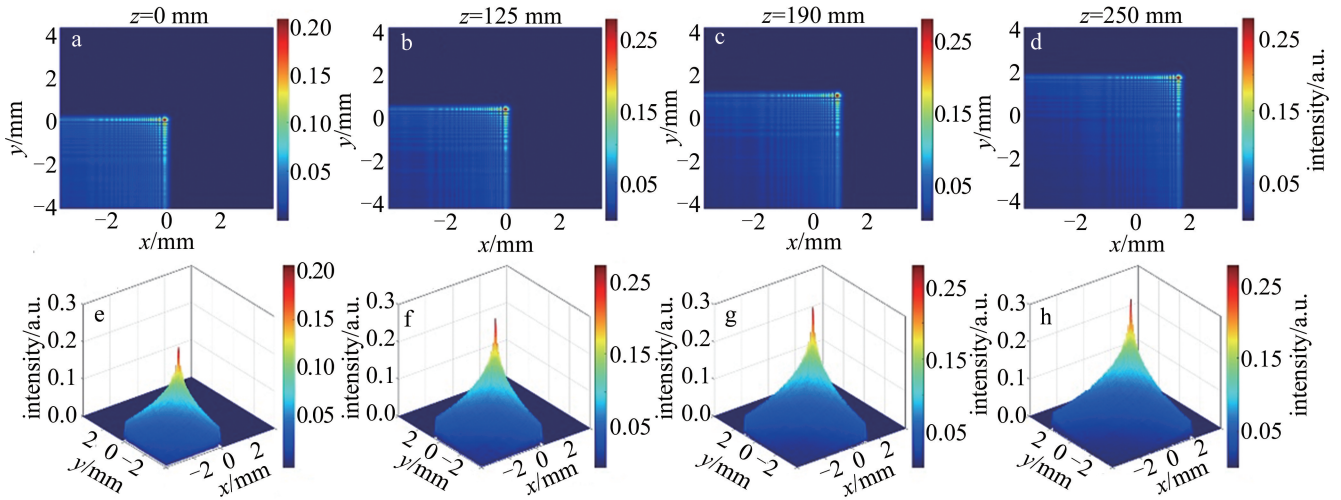


图5 高斯光束有位移时的2-D Airy 光束强度

Fig. 5 Intensity of 2-D Airy beam with Gaussian beam displacement

时的传输距离,作为2-D Airy 光束的无衍射传输距离^[23]。如图5a所示,当移动高斯光束($D_{G,x}=D_{G,y}=4$)时,在 $z=0$ mm处峰值光束强度为0.20,与图4a相比,光束强度衰减,峰值光束强度的位置发生了改变,不再位于初始距离处;如图5b所示,调控后的2-D Airy 光束传播到 $z=125$ mm时,此时2-D Airy 光束强度为0.26,光束强度随传播距离的增加而增加;如图5c所示,在 $z=190$ mm时,2-D Airy 光束强度为0.28,恢复峰值光束强度,通过高斯光束在频域的位移实现了2-D Airy 光束峰值强度位置的变化,利用高斯光束的位移调控,可以将峰值强度传播到目标点;如图5d所示,调控后的2-D Airy 光束传播到 $z=250$ mm时,2-D Airy 光束强度为0.27,仍然保持了2-D Airy 光束的特性,可在此基础上继续无衍射传播一段距离。从图5e~图5h对应的3-D仿真图可以明显地看出,高斯光束位移后2-D Airy 光束峰值强度位置的变化,并且峰值光强恢复后2-D Airy 光束继续无衍射传播,不影响2-D Airy 光束的特性。

由公式 $\xi-\sqrt{2}D_c=0$ 可知,随着高斯光束的位移,峰值光束强度的位置逐渐远离初始位置 $z=0$ mm。如图6所示,仿真在 $z=190$ mm时,高斯光束不同位移对2-D Airy 光束强度有影响。从图中可以看出,随着高斯光束位移的增加,在 $z=190$ mm处2-D Airy 光束强度不断增强,直至恢复无衍射峰值光束强度,但是高斯光束的移动范围需在相位图大小的范围内。

2.2 2-D Airy 光束阵列的初始强度及自聚焦特性

对2-D Airy 光束阵列的自聚焦特性以及初始光强进行仿真分析。2-D Airy 光束阵列的相位图如图7所

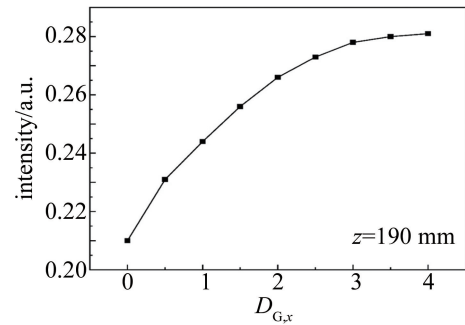


图6 高斯光束的不同位移对2-D Airy 光束强度影响

Fig. 6 Effect of different displacements of Gaussian beam on the intensity of 2-D Airy beam

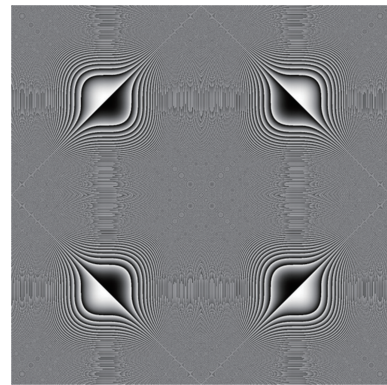


图7 2-D Airy 光束阵列的相位图

Fig. 7 Phase diagram of 2-D Airy beam array

示。将图2的Airy 光束生成系统中相位图换成图7的2-D Airy 光束阵列相位图,在傅里叶透镜的后焦点生成2-D Airy 光束阵列。

根据式(5)对2-D Airy 光束阵列自聚焦过程进行仿真, $c=1$ mm, $D_{G,x}=D_{G,y}=0$,如图8所示。图8分别是 z 为0 mm、125 mm、180 mm和190 mm时,2-D Airy

光束阵列强度的仿真以及对应的 3-D 图,可以更直观地对光束强度进行观察。

图 8a 在 $z=0$ mm 处,2-D Airy 光束阵列的 4 个 2-D Airy 光束主瓣都指向阵列中心,且每个主瓣中心到阵列中心的距离相同,从图 8a 对应的 3-D 图可以看出,每个 2-D Airy 光束强度为 0.28,与图 4a 中 2-D Airy 光束在 $z=0$ mm 时的光束强度一致,2-D Airy 光束阵列中的单个 2-D Airy 光束仍然保持了 2-D Airy 光束的特性。

图 8b 为传播一段距离后,在 $z=125$ mm 处的光束聚焦情况,可以看出,相较于在 $z=0$ mm,光束间隔变小,但光束还未接触,4 个 2-D Airy 光束仍保持各自的光

学特性,继续向阵列中心传播。将图 8e 和图 8f 做比较,在传播 125 mm 后,因 2-D Airy 光束的无衍射性,在聚焦之前,4 个 2-D Airy 光束基本保持其初始强度。

如图 8c 所示,在光束传播到 $z=180$ mm 时,4 个 2-D Airy 光束相互接触,但还未融合;如图 8g 所示,此时 Airy 光束阵列强度还未突增。

如图 8d 所示,在光束传播到 $z=190$ mm 时,4 个 2-D Airy 光束相互融合完成了自聚焦,此时光束强度突增为 0.56,与图 4c 和图 5c 相比,实现了 2-D Airy 光束阵列强度在焦点的提高。此时,在经过 4 个 2-D Airy 光束传输一段距离后实现的自聚焦光束初始强度为 0.85。

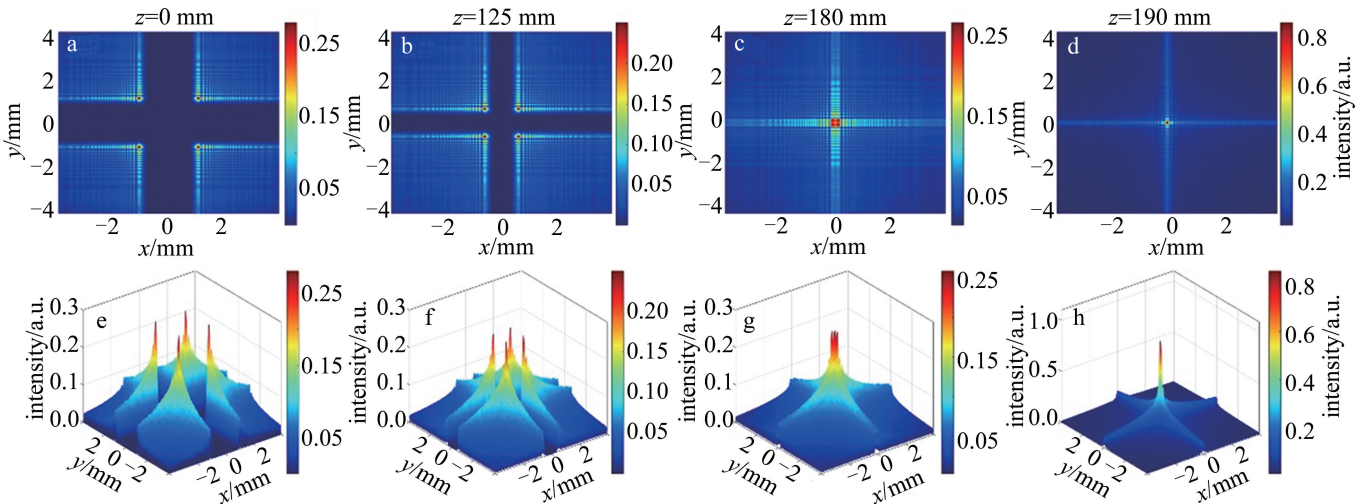


图 8 2-D Airy 光束阵列自聚焦过程示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the self-focusing process of 2-D Airy beam array

2.3 2-D Airy 光束阵列焦点处强度的调控

从图 4 和图 5 可以看出,通过对高斯光束在频域的位移调控,仿真实现了 2-D Airy 光束峰值强度位置的变化;从图 8 可以看出,2-D Airy 光束阵列的自聚焦可以在焦点实现光束强度的突增,相比单个 2-D Airy 光束强度更高,但在焦点完成自聚焦之前,阵列中每个 2-D Airy 光束仍要传播一段距离才能完成自聚焦,随着阵列中每个 2-D Airy 光束的传播,光束强度会损失一部分,通过对高斯光束在频域的位移调控可实现 2-D Airy 光束阵列焦点的强度的增强。图 9 为高斯光束在 2-D Airy 光束阵列频域的位移示意图。图中红点表示高斯光束的位置,箭头表示高斯光束的位移方向。

在频域移动高斯光束时,2-D Airy 光束阵列各象限光束强度调控的仿真结果如图 10 所示。在第一象限沿 45° 方向移动高斯光束 ($D_{G,x} = D_{G,y} = d, d > 0$),当高斯光束发生位移时,对于 4 个象限中每个 2-D Airy 光束的位移都不同。下面首先仿真了高斯光束位移 ($D_{G,x} =$

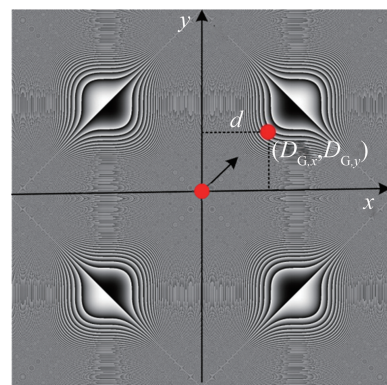


图 9 高斯光束在 2-D Airy 光束阵列频域的位移示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the displacement of Gaussian beam in frequency domain of 2-D Airy beam array

$D_{G,y} = 1$) 时,在 $z=0$ mm 初始平面处,对每个象限中的 2-D Airy 光束强度的影响,图 10 分别是 2-D Airy 光束阵列在第一象限、第二象限、第三象限、第四象限的光束强度仿真图,以及对应的 2-D Airy 光束阵列强度的 3-D 图。

如图 10 所示, 高斯光束位移 $D_{G,x}=D_{G,y}=1$ 时, 第一象限的 2-D Airy 光束强度为 0.281; 第二象限 2-D Airy 光束强度为 0.270; 第三象限 2-D Airy 光束强度为 0.259; 第四象限 2-D Airy 光束强度为 0.271, 高斯

光束位移对 2-D Airy 光束阵列中的每个光束强度产生不同的影响, 从而在频域位移不同距离的高斯光束对焦点处自聚焦的 2-D Airy 光束阵列强度产生不同影响。

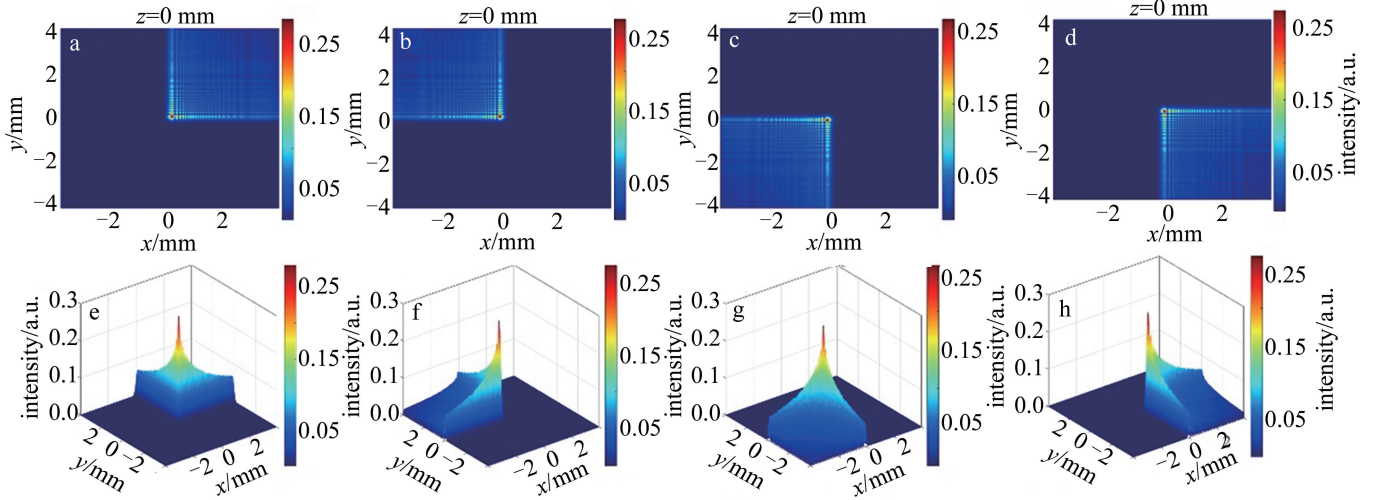


图 10 高斯光束位移 $D_{G,x}=D_{G,y}=1$ 时, 2-D Airy 光束阵列各象限强度的仿真

Fig. 10 Intensity of each quadrant of 2-D Airy beam array at Gaussian beam displacement $D_{G,x}=D_{G,y}=1$

通过高斯光束的位移可以控制 2-D Airy 光束阵列焦点的强度, 图 11 为移动高斯光束, 即 $(D_{G,x}, D_{G,y})$ 取不同值时, 在 $z=190$ mm 2-D Airy 光束阵列自聚焦处, Airy 光束阵列强度的仿真结果以及对应的 3-D 仿真结果。

从图 8d 可以看出, 在不移动高斯光束, 即 $D_{G,x}=D_{G,y}=0, z=190$ mm 时, 2-D Airy 光束阵列强度为 0.85。

如图 11a 所示, 移动高斯光束, $D_{G,x}=D_{G,y}=1$, 2-D Airy 光束阵列自聚焦强度为 0.96; 如图 11b 所示, $D_{G,x}=D_{G,y}=2$, 2-D Airy 光束阵列自聚焦强度为 1.04; 如图 11c 所示, $D_{G,x}=D_{G,y}=3$, 2-D Airy 光束阵列自聚焦强度为 1.1。随着高斯光束的移动, 对焦点处自聚焦的 2-D Airy 光束阵列强度进行了调控, 实现了 2-D Airy 光束阵列强度的增强。

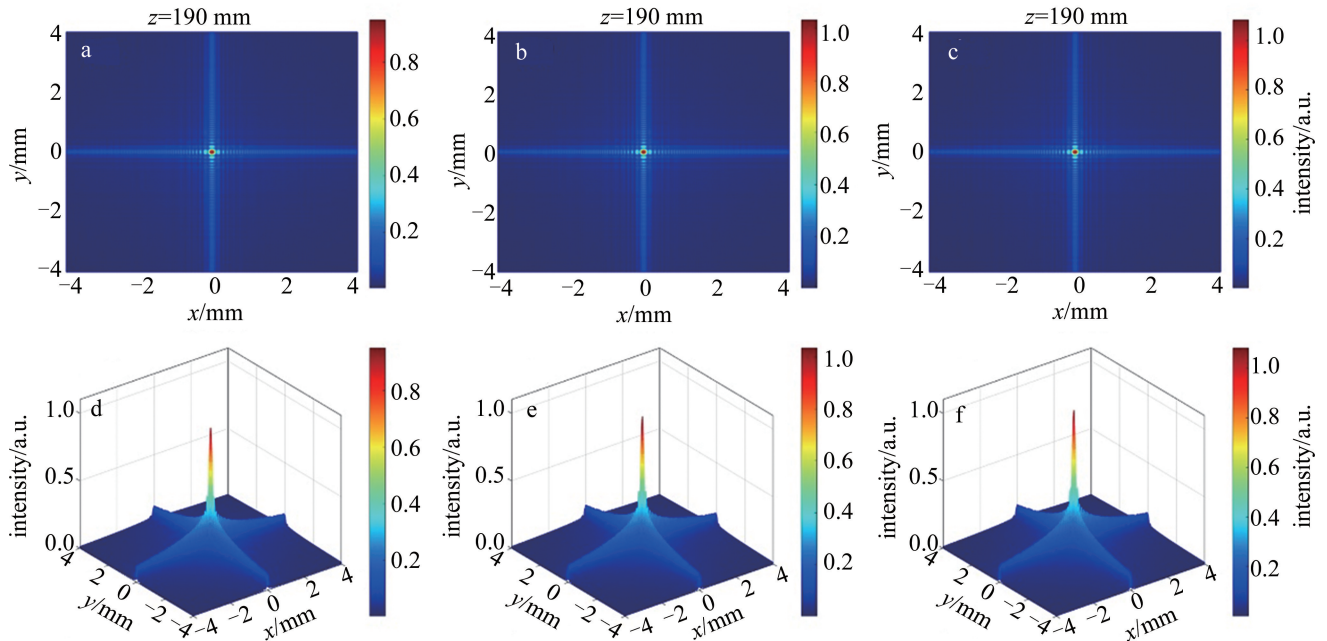


图 11 高斯光束位移后 2-D Airy 光束阵列焦点的强度仿真

Fig. 11 2-D Airy beam array intensity in focus simulation after Gaussian beam displacement

因 2-D Airy 光束阵列中每个光束在自聚焦之前保持了 Airy 光束的光学特性,通过高斯光束位移对每个 2-D Airy 光束强度的调控,实现了 2-D Airy 光束阵列焦点处强度的调控,在 2-D Airy 光束阵列焦点固定的情况下,可灵活方便地对 2-D Airy 光束阵列强度进行调控,且过程简单。

2.4 模拟大气湍流条件下 2-D Airy 光束阵列强度调控的效果

因 Airy 光束的无衍射特性,对大气湍流具有一定的抑制能力,2-D Airy 光束阵列强度的调控使焦点汇聚的能量更强,为光束抵抗大气湍流提供了一种新的方法,通过模拟 2-D Airy 光束阵列强度在大气湍流中的调控,分析了此方法对 2-D Airy 光束阵列光强的影响,如图 12 所示,模拟了湍流条件下 2-D Airy 光束阵列强度调控的效果。

通过功率谱反演法生成随机湍流相位屏,将 2-D

Airy 光束阵列通过生成的随机湍流相位屏,进行大气湍流的强度仿真,仿真参数为:大气折射率结构常数 $C_n^2 = 8 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, $x_0 = 11 \text{ mm}$, $y_0 = 11 \text{ mm}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $c = 1 \text{ mm}$, $\alpha = 0.01$,光束在 1 km 处聚焦。图 12 为中等湍流强度下,在 $z = 1 \text{ km}$ 2-D Airy 光束阵列自聚焦处,Airy 光束阵列强度仿真图以及对应的 3-D 仿真结果。如图 12a 所示,没有湍流、不移动高斯光束、 $D_{G,x} = D_{G,y} = 0$ 和 $z = 1 \text{ km}$ 时,2-D Airy 光束阵列强度为 1.09;此时在不移动高斯光束的情况下,加入湍流,光束强度仿真结果如图 12b 所示,2-D Airy 光束阵列强度为 0.85,因为大气湍流的影响,光束强度降低;通过移动高斯光束,使 $D_{G,x} = D_{G,y} = 1.43$,如图 12c 所示,在 $z = 1 \text{ km}$ 处,加入湍流的情况下,2-D Airy 光束阵列自聚焦强度增强为 1.03,提高了 2-D Airy 光束阵列抵抗大气湍流的能力,使光束在焦点处的强度增强。

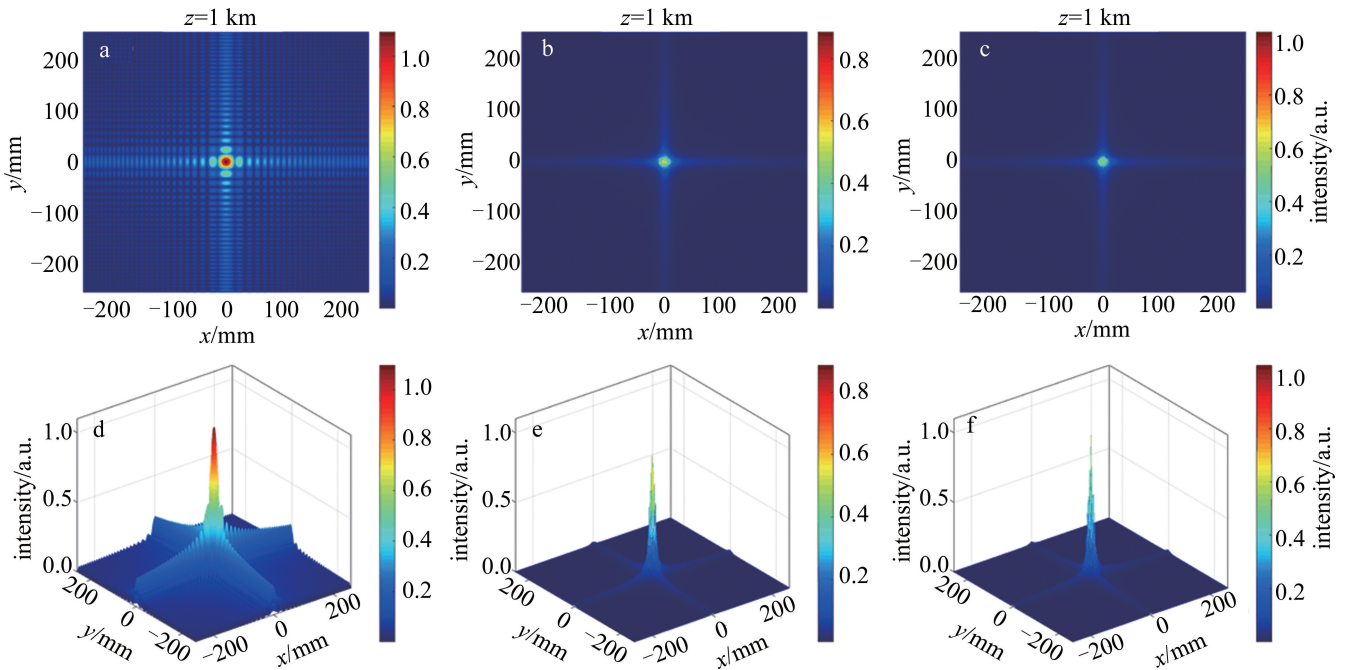


图 12 中等湍流条件下,2-D Airy 光束阵列焦点强度的仿真图

Fig. 12 Simulation of focal intensity of 2-D Airy beam array under moderate turbulence conditions

3 结论

理论分析了 2-D Airy 光束阵列焦点处强度调控的原理,并对其进行了仿真研究。通过仿真发现:在高斯光束的调控下,2-D Airy 光束峰值强度可以由初始位置 $z = 0 \text{ mm}$ 处调控到 $z = 190 \text{ mm}$ 处,实现了对 2-D Airy 光束峰值强度位置的调控;在 2-D Airy 光束峰值强度调控的基础上,对 2-D Airy 光束阵列焦点处的强度实现了增强,在未调控的情况下,2-D Airy 光束阵列焦点

处的初始光强为 0.85,经过高斯光束在频域的调控,焦点处的光强增加为 1.1,实现了 2-D Airy 光束阵列焦点处强度的增强;大气湍流条件下,通过强度调控,在 $z = 1 \text{ km}$ 处 2-D Airy 光束阵列强度由 0.85 增强到 1.03,对抵抗大气湍流具有一定的作用,在激光通信增强接收端信号方面具有重要的研究价值。

参考文献

- [1] SIVIOGLOU G A, BROKY J, DOGARIU A, *et al.* Observation of accelerating Airy beams [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99

- (21): 213901.
- [2] SIVILOGLOU G A, CHRISTODOULIDES D N. Accelerating finite energy Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(8): 979-981.
- [3] SIVILOGLOU G A, BROKY J, DOGARIU A, *et al.* Ballistic dynamics of Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(3): 207-209.
- [4] WANG X Y, TU J L, YU X, *et al.* Optimizing ballistic motion of partially coherent multiple Airy beams by quadratic and linear phases[J]. *Annalen der Physik*, 2021, 533(9): 2100165.
- [5] LI D H, BONGIOVANNI D, GOUTSOULAS M, *et al.* Direct comparison of anti-diffracting optical pin beams and abruptly autofocusing beams[J]. *OSA Continuum*, 2020, 3(6): 1525-1535.
- [6] ZHANG Z, LIANG X L, GOUTSOULAS M, *et al.* Robust propagation of pin-like optical beam through atmospheric turbulence[J]. *APL Photonics*, 2019, 4(7): 076103.
- [7] LIU X, XIA D N, MONFARED Y E, *et al.* Generation of novel partially coherent truncated Airy beams via Fourier phase processing[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 9777-9785.
- [8] WANG Y F, JIANG Y F. Dual autofocusing circular Airy beams with different initial launch angles[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, 278: 108010.
- [9] EFREMIDIS N K, CHEN Z G, MORDECHAI S, *et al.* Airy beams and accelerating waves: An overview of recent advances[J]. *Optica*, 2019, 6(5): 686-701.
- [10] ZHANG Y K, GUO M J, LI J H, *et al.* Propagation characteristics of twisted multi-Gaussian beams in gradient index fibers[J]. *Laser Technology*, 2022, 46(5): 594-600 (in Chinese).
张雅凯,郭苗军,李晋红,等. 扭曲多高斯光束在梯度折射率光纤中的传输特性[J]. *激光技术*, 2022, 46(5): 594-600.
- [11] WANG Q Zh, TIAN K J, XIA X P. Beam distortion regulation in Gaussian laser circular aperture diffraction[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(1): 119-123 (in Chinese).
王琦臻,田恺婧,夏雄平. 高斯型激光圆孔衍射中的光束畸变调控研究[J]. *应用光学*, 2022, 43(1): 119-123.
- [12] EFREMIDIS N K, CHRISTODOULIDES D N. Abruptly autofocusing waves[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(23): 4045-4047.
- [13] PAPAOGLOU D G, EFREMIDIS N K, CHRISTODOULIDES D N, *et al.* Observation of abruptly autofocusing waves[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(10): 1842-1844.
- [14] ZHANG Z, LIU J J, ZHANG P, *et al.* Generation of autofocusing beams with multi-Airy beams[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(3): 034209 (in Chinese).
张泽,刘京郊,张鹏,等. 多艾里光束合成自聚焦光束的实验实现[J]. *物理学报*, 2013, 62(3): 034209.
- [15] HU Y, ZHANG P, LOU C B, *et al.* Optimal control of the ballistic motion of Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(13): 2260-2262.
- [16] CHEN C Y, YANG H M, KAVEHRAD M, *et al.* Propagation of radial Airy array beams through atmospheric turbulence[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 52(1): 106-114.
- [17] EZ-ZARIY L, HRICHA Z, BELAFHAL A. Novel finite Airy array beams generated from Gaussian array beams illuminating an optical Airy transform system[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2016, M49: 41-50.
- [18] WU P F, KE X Zh, SONG Q Q. Realization of experiment on autofocusing array Airy beam[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0605002 (in Chinese).
吴鹏飞,柯熙政,宋强强. 自聚焦阵列艾里光束的实验实现[J]. *中国激光*, 2018, 45(6): 0605002.
- [19] DAFNE A, ÓSCAR M, PABLO V. Abruptly autofocusing beams from phase perturbations having forced symmetry[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(15): 3733-3736.
- [20] XU D L, LIU Y J, MO Z W, *et al.* Shaping autofocusing Airy beams through the modification of Fourier spectrum[J]. *Optics Express*, 2022, 30(1): 232-242.
- [21] WANG L, JI X L, LI X Q, *et al.* Focusing and self-healing characteristics of Airy array beams propagating in self-focusing media[J]. *Applied Physics*, 2019, B125(9): 165.
- [22] LU Q. Generation of Airy beam arrays based on a LCOS device and research on their scintillation characteristics [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017: 35-47 (in Chinese).
鲁强. 基于 LCOS 的 Airy 光束阵列生成及其光强闪烁特性的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017: 35-47.
- [23] SHI Y Y, WU T, LIU Y W, *et al.* Control of self-bending Airy beams[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(12): 1401-1407 (in Chinese).
施瑶瑶,吴彤,刘友文,等. 艾里光束自弯曲性质的控制[J]. *光子学报*, 2013, 42(12): 1401-1407.
- [24] JIANG N, LI X Y, NIU Ch H, *et al.* Experimental study on the influence of atmospheric turbulence on laser spatial transmission characteristics[J]. *Laser Technology*, 2022, 46(5): 708-712 (in Chinese).
姜楠,李晓英,牛春晖,等. 大气湍流对激光空间传输特性影响的实验研究[J]. *激光技术*, 2022, 46(5): 708-712.
- [25] ZHENG Ch H, WANG T Sh, LIU Zh Q, *et al.* Deep transfer learning method to identify orbital angular momentum beams[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, 49(6): 210409 (in Chinese).
郑崇辉,王天枢,刘哲琦,等. 深度迁移学习方法识别轨道角动量光束[J]. *光电工程*, 2022, 49(6): 210409.
- [26] WANG X. Research on self-focusing characteristics of Airy beam [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2022: 51-57 (in Chinese).
王鑫. Airy 光束自聚焦特性研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2022: 51-57.
- [27] CHEN M. Numerical analysis of the influence of non-Kolmogorov turbulence on laser propagation in atmosphere [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017: 12-17 (in Chinese).
陈鸣. 非 Kolmogorov 湍流对激光大气传输影响的模拟分析[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017: 12-17.