

自聚焦阵列艾里光束的实验实现

吴鹏飞, 柯熙政, 宋强强

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 具有自聚焦性的阵列艾里光束的光束强度较强, 光束密度较大, 对大气湍流和大气散射的抑制优势明显, 可在接收端接收到较强的光信号, 提高大气激光通信质量。将多个可产生艾里光束的立方相位膜片进行有序排列可生成多相位膜片, 利用多相位膜片可产生具有自聚焦性的阵列艾里光束。仿真和实验说明了阵列艾里光束的自聚焦过程及光斑尺寸对其自聚焦性能的影响。结果表明, 基于多相位膜片产生的阵列艾里光束具有自聚焦性, 且其自聚焦的聚焦位置随光斑尺寸的变大而变大。因此, 通过控制阵列中每个艾里光束的光斑尺寸, 可有效控制艾里光束的自聚焦位置。

关键词 大气光学; 自聚焦; 艾里光束; 多相位膜片; 光束密度

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0605002

Realization of Experiment on Auto-Focusing Array Airy Beam

Wu Pengfei, Ke Xizheng, Song Qiangqiang

College of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract Self-focused array Airy beam has properties of high strength and large beam density, which makes it have strong inhibition for atmospheric turbulence and atmospheric scattering. Thus it can be used to receive much stronger signals on the receiver side and greatly improve the quality of atmospheric laser communication. A plurality of cubic phase masks that can produce Airy beams are orderly arranged to produce a multiphase diaphragm, which then can produce an array Airy beam with self-focusing. The simulation and experiment explain the auto-focusing process of Airy beams and the effect of spot size on its auto-focusing performance. The experimental results show that the array Airy beam, based on multiphase diaphragms, can be auto-focus, and the auto-focusing size gets larger as the spot size gets larger. Thus, by means of adjusting the spot size of each Airy beam in the array, the Airy's auto-focusing position can be controlled effectively.

Key words atmospheric optics; auto-focusing; Airy beams; multiphase diaphragm; beam density

OCIS codes 010.1330; 060.2605; 060.4080

1 引 言

艾里光束是一种无衍射光束, 并且具有独特的自弯曲特性, 有关艾里光束的研究大多只是针对单个一维艾里光束或者单个二维艾里光束的特性及应用。单个光束经远距离传输后, 受光束衍射与大气湍流的影响, 光束界面将出现光束弯曲、漂移与扩展、强度起伏及相干性退化等现象^[1-3], 光束强度变低, 密度变小, 导致接收端的光电转换器由于接收的光信号较弱而使通信质量变差, 所以单个光束的光

束强度、光束密度以及对大气湍流的抑制优势并不大^[4]。因此, 使用无衍射、具有更高光束强度及更大密度的光束对于抵御大气湍流、提高通信效率, 将更具有优势^[5]。

通过透镜或多光束合成的方式可提高光束功率和密度^[6]。利用透镜提高光束功率时, 因透镜焦距固定不变, 所以整个系统聚焦位置和功率密度基本确定, 若改变聚焦位置需进行机械移动, 这极大地降低了光束聚焦的灵敏度和精度, 而且由于透镜材料的限制, 其接受的功率阈值也将收到

收稿日期: 2017-08-09; 收到修改稿日期: 2017-11-19

基金项目: 陕西省重点产业创新链计划(2017ZDCXL-GY-06-01)、陕西省工业攻关项目(2016GY-086)、西安市高校院所人才服务企业工程计划[2017080CG/RC043(XALG001)]、西安理工大学科技创新计划(2016CX041)

作者简介: 吴鹏飞(1980—), 男, 博士, 讲师, 主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: wupengf@xaut.edu.cn

限制,系统能够承受的功率强度降低。多光束合成是通过合成多个光束、生成阵列光束来提高光束功率和功率密度,该方法不受材料限制,可最大限度地提高系统的承受功率强度,且阵列光束具有更高的光束强度与更大的光束密度,所以很有必要研究阵列艾里光束^[7]。

张泽等^[8]在实验和仿真中通过计算全息图生成了具有自聚焦特性的阵列艾里光束,此阵列中的光束均为一维艾里光束。王晓章^[9]将 Dammann 光栅与产生艾里光束的立方相位膜片相结合,生成的复合灰度图在实验上实现了阵列艾里光束。分析对比这两种方法可知,基于计算全息图产生的阵列艾里光束具有自聚焦性,但每个光束都是一维艾里光束,而同样具有无衍射、自弯曲传输特性的二维艾里光束具有更高的光束强度和更大的光束密度,且二维艾里光束在两个横向维度上,可提高自聚焦光束的总功率,具有良好的功率可扩展性,因此二维艾里光束更具有实际应用性。另外,利用 Dammann 光栅产生的阵列艾里光束中,虽然每个光束都是二维艾里光束,但光束主瓣都指向同一方向,所以并无自聚焦性。

本文利用多个二维艾里光束生成了具有自聚焦特性的阵列二维艾里光束,通过增加或减少光束个数,来调节阵列光束的总功率。将各光束的主瓣中心都指向阵列中心,由于艾里光束的自弯曲性,阵列艾里光束还可实现自聚焦。通过调节相位膜片参数,控制艾里光束的自弯曲轨迹,可有效调节阵列艾里光束的自聚焦位置。

2 理论基础

利用多个二维艾里光束可实现具有自聚焦特性的阵列二维艾里光束,所以首先对二维艾里光束的理论基础进行分析。

(1+1)维情况下的旁轴衍射方程为^[10]

$$i \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial s^2} = 0, \quad (1)$$

式中: $s = x/x_0$ 为一维无量纲横向坐标, x_0 为横向尺度,即主瓣的束腰半径; $\xi = z/k_0 x_0^2$ 为归一化传播距离, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为波数。由(1)式可得艾里函数的非色散解^[10]:

$$\phi(\xi, s) = A_i \left[s - \left(\frac{\xi}{2} \right)^2 \right] \exp \left[i s \frac{\xi}{2} - i \left(\frac{\xi^3}{12} \right) \right], \quad (2)$$

式中: $A_i(*)$ 为无限能量艾里函数,该函数包含无

穷大能量,现实中无法产生,无实际意义,是理想情况下的光束。因此对无限能量艾里函数乘以指数函数,使其能量得到限制,如^[11]

$$\phi(s, \xi = 0) = A_i(s) \exp(as), \quad (3)$$

式中:指数函数的系数 a 为衰减因子, $a > 0$ 且 $a \ll 1$, 指数函数使艾里函数的尾部被快速削弱,从而保证艾里函数的能量是有限的。

将(3)式代入(1)式可得有限能量艾里函数的解^[11]:

$$\begin{aligned} \phi(s, \xi) = & A_i \left[s - \left(\frac{\xi}{2} \right)^2 + ia\xi \right] \times \\ & \exp \left[as - \left(\frac{a\xi^2}{2} \right) - i \left(\frac{\xi^3}{12} \right) + i \left(\frac{a^2 \xi}{2} \right) + i \left(\frac{s\xi}{2} \right) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

式中:一维无量纲横向坐标 s 代表变量 x 或 y , 且 x 和 y 在(1+1)维旁轴衍射方程即(1)式中的地位平等,所以通过一维艾里函数可构建二维艾里函数,二维艾里函数的数学表达式是两个分别以 x 和 y 为变量的一维艾里函数相乘得到,即^[11]

$$\begin{aligned} \phi(x, y, z) = & \phi(x, z) \times \phi(y, z) = \\ & A_i \left[\frac{x}{x_0} - \left(\frac{z}{2z_0} \right)^2 + ia \frac{z}{z_0} \right] \times A_i \left[\frac{y}{y_0} - \left(\frac{z}{2z_0} \right)^2 + ia \frac{z}{z_0} \right] \times \\ & \exp \left[a \frac{x}{x_0} - \frac{a}{2} \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 - i \frac{1}{12} \left(\frac{z}{z_0} \right)^3 + i \frac{a^2}{2} \left(\frac{z}{z_0} \right) + \right. \\ & \left. i \left(\frac{1}{2} \frac{x}{x_0} \frac{z}{2z_0} \right) \right] \times \exp \left[a \frac{y}{y_0} - \frac{a}{2} \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 - \right. \\ & \left. i \frac{1}{12} \left(\frac{z}{z_0} \right)^3 + i \frac{a^2}{2} \left(\frac{z}{z_0} \right) + i \left(\frac{1}{2} \frac{y}{y_0} \frac{z}{2z_0} \right) \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

对(5)式进行模拟仿真,仿真参数设定为:波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 、横向尺度 $x_0 = 10 \text{ mm}$ 、衰减因子 $a = 0.05$,可得到二维艾里光束的光强分布图,如图1所示。

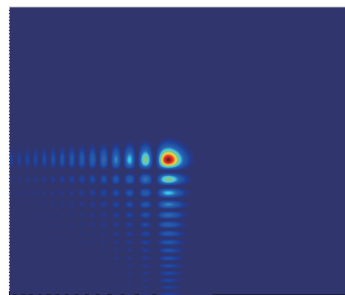


图1 二维艾里光束图像

Fig. 1 Two-dimensional Airy beam image

阵列艾里光束由4个艾里光束组成,通过改变4个艾里函数相位可使每个光束的主瓣指向阵列中心,得到阵列艾里函数为

$$\begin{aligned} \psi(x, y, z) = & \phi(x, y, z) + \phi(-x, y, z) + \\ & \phi(x, -y, z) + \phi(-x, -y, z) = \\ & A_i(x, z) \times A_i(y, z) + A_i(-x, z) \times A_i(y, z) + \\ & A_i(x, z) \times A_i(-y, z) + A_i(-x, z) \times A_i(-y, z). \end{aligned} \quad (6)$$

对(6)式进行仿真,仿真参数设定为:波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 、横向尺度 $x_0 = 10 \text{ mm}$ 、衰减因子 $a = 0.05$,可得到如图2所示的阵列艾里光束。

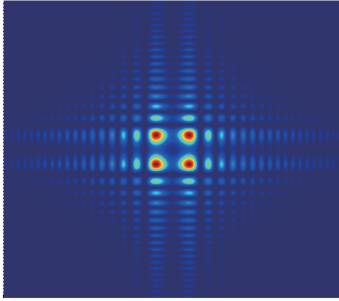


图2 阵列艾里光束的仿真图

Fig. 2 Simulation chart of array Airy beam

从图2可以看出,图中的阵列艾里光束由4个二维艾里光束组成,且4个艾里光束的主瓣都指向

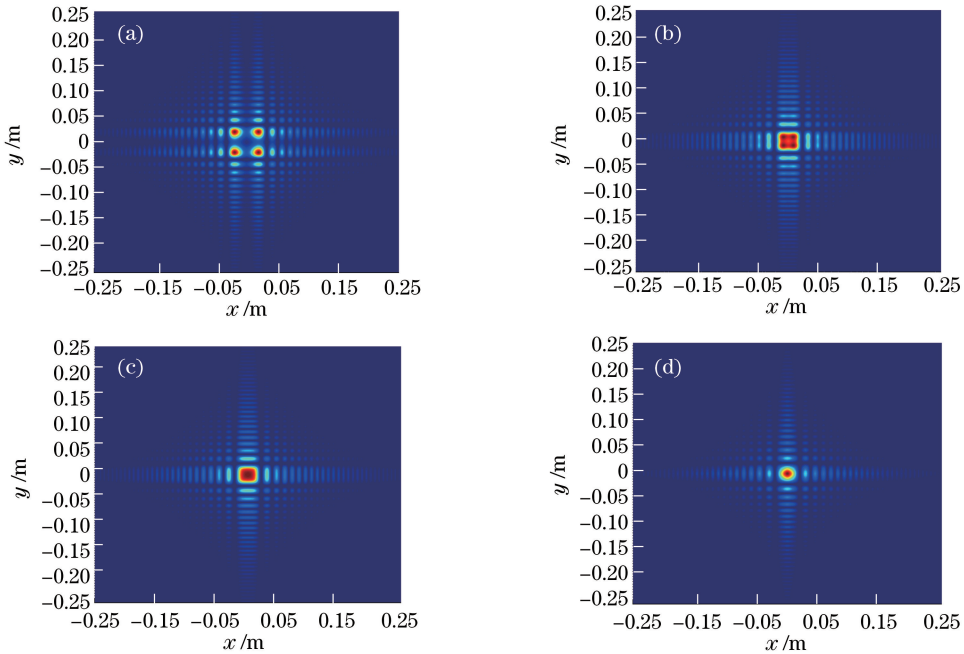


图3 阵列二维艾里光束自聚焦性的模拟验证。(a) $z=0 \text{ m}$; (b) $z=300 \text{ m}$; (c) $z=700 \text{ m}$; (d) $z=1000 \text{ m}$

Fig. 3 Simulation of self-focusing of two-dimensional array Airy beam. (a) $z=0 \text{ m}$; (b) $z=300 \text{ m}$; (c) $z=700 \text{ m}$; (d) $z=1000 \text{ m}$

阵列艾里光束具有自聚焦特性是因为阵列二维艾里光束初始界面处的光强分布是4个相互独立的二维艾里光束,且主瓣方向都朝向中心。艾里光束具有自弯曲特性,其自弯曲偏移轨迹如图4所示。

图4为艾里光束在传播距离0 m、1000 m处的

阵列中心,每个艾里光束的参数相同,所以这4个光束到阵列中心的距离相同,并且这4个艾里光束相互独立,可单独设置每个光束的参数。

3 阵列二维艾里光束自焦距性的模拟仿真

3.1 阵列二维艾里光束的自聚焦性

通过观察阵列艾里光束的传播过程来验证阵列二维艾里光束是否具有自聚焦性。图3为阵列二维艾里光束自聚焦过程的光强分布图。图3(a)为阵列艾里光束在传播距离 $z=0 \text{ m}$ 处,即初始面处的光强分布图,可以看出,阵列艾里光束的主瓣都指向阵列中心,且每束光的主瓣中心到阵列中心的距离相同;阵列光束继续向前传播,当 $z=300 \text{ m}$ 时,如图3(b)所示,这4束二维艾里光束的主瓣和旁瓣已经相互接触但未融合;当 $z=700 \text{ m}$ 时,阵列光束的光强分布如图3(c)所示,这4束二维艾里光已经开始融合,但其光束主瓣未完全融合;当 $z=1000 \text{ m}$ 时,如图3(d)所示,这4束二维艾里光已完全融合,表明阵列艾里光束已完成自聚焦。

光强分布图。由图4可知,当艾里光束向 z 方向传输时,其光束主瓣在 $x-y$ 平面沿 45° 方向偏移,在阵列艾里光束中,由于这4束艾里光束参数相同,每个艾里光束自弯曲的偏移量相同,所以当阵列光束传输一段距离之后,这4束艾里光束将慢慢向中心偏

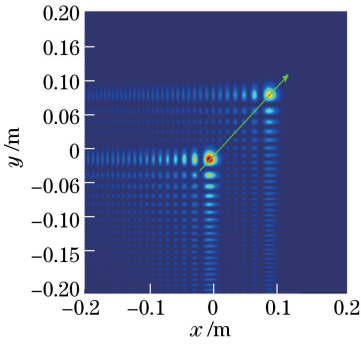


图 4 二维艾里光束主瓣偏移轨迹

Fig. 4 2D Airy beam main lobe migration trajectory

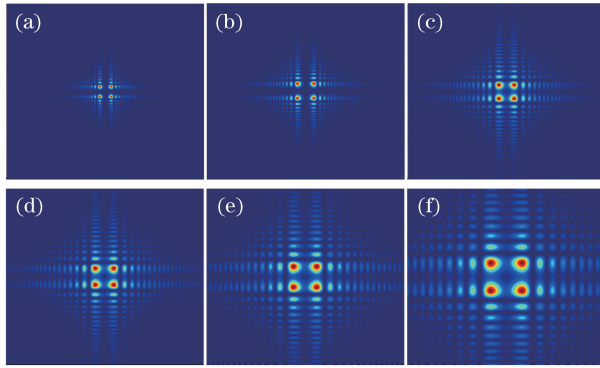


图 5 不同横向尺度 x_0 下的阵列艾里光束的初始光强分布。(a) $x_0=5$ mm;(b) $x_0=7$ mm;
(c) $x_0=10$ mm;(d) $x_0=12$ mm;(e) $x_0=15$ mm;(f) $x_0=20$ mm

Fig. 5 Initial light intensity distribution of the array Airy beam at different lateral scales.

(a) $x_0=5$ mm; (b) $x_0=7$ mm; (c) $x_0=10$ mm; (d) $x_0=12$ mm; (e) $x_0=15$ mm; (f) $x_0=20$ mm

由图 5 可见,随着 x_0 的增大,阵列艾里光束中每个光束的光斑逐渐变大,光束的光场强度增大。通过模拟仿真可知,当 x_0 取不同值时,阵列艾里光束分别继续向前传播 820, 1580, 3150, 4590, 6940, 13890 m 后可实现自聚焦,4 束光束的主瓣合成一束。根据上述结果拟合出 x_0 与自聚焦所需传播距离的关系如图 6 所示。

由图 6 可知,随着 x_0 的增大,阵列艾里光束自

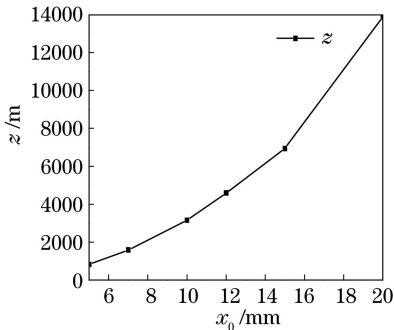


图 6 横向尺度 x_0 对自聚焦的影响

Fig. 6 Effect of transverse scale x_0 on self-focusing

移,最终达到自聚焦的目的。

3.2 横向尺度 x_0 对自焦距的影响

阵列艾里光束是由 4 个独立二维艾里光束组成,且自聚焦的聚焦位置是由每个艾里光束的自弯曲程度决定,可见聚焦位置是可控的。单个艾里光束的自弯曲轨迹受横向尺度 x_0 的影响,但不受衰减因子 a 的影响,所以通过改变 x_0 可控制阵列艾里光束的自聚焦位置。

为了验证 x_0 对阵列艾里光束自聚焦焦距的影响,设定阵列艾里光束的其他参数不变,通过改变 x_0 值来分析阵列光束完成聚焦需要的传播距离,如图 5 所示。

聚焦所需传播距离 z 也不断增大,这可用艾里光束自弯曲的轨迹函数解释^[12],如

$$x = \frac{\lambda^2 z^2}{16\pi^2 x_0^3}, \quad (7)$$

$$y = \frac{\lambda^2 z^2}{16\pi^2 y_0^3}. \quad (8)$$

(7)式和(8)式为横向尺度、横向自弯曲偏移及传播距离的关系式。由于二维艾里光束中横向尺度 x_0 和 y_0 的意义相同,所以只针对 x_0 进行讨论。由(7)式可以看出,随着传播距离 z 的增加,艾里光束主瓣偏移坐标 x 与横向尺度 x_0 成反比,在自弯曲偏移量 x 不变的情况下,即主瓣中心离阵列中心的距离不变,随着 x_0 变大, z 也变大,而且由于横向尺度 x_0 是 3 次方,所以当 x_0 增大时, z 增大得更快。

4 基于相位膜片的阵列艾里光束的实验产生

利用多相位膜片在实验中产生阵列艾里光束,多相位膜片是利用多个参数相同的二维艾里光束的

立方相位膜片叠加而成。图 7 展示了实验产生阵列艾里光束的方法。

图 7(a)为实验装置图,图 7(b)为阵列艾里光束的相位膜片图,将其加载到图 7(a)中的液晶空间光调制器上便可产生如图 7(c)所示的阵列艾里光束。

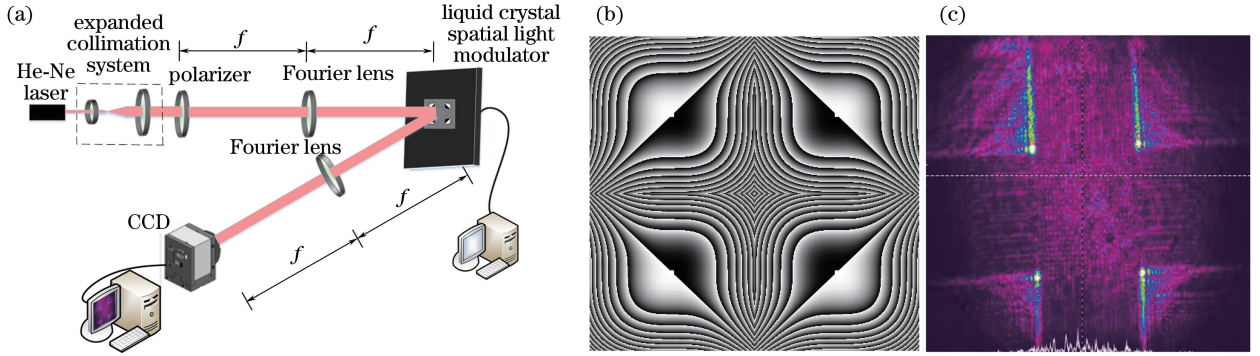


图 7 实验产生阵列艾里光束。(a)实验装置图;(b)多相位膜片;(c)阵列艾里光束

Fig. 7 Experiment generation of array Airy beam. (a) Experimental setup; (b) multiphase diaphragm; (c) array Airy beam

4.1 实验验证艾里光束自聚焦性

文中的阵列艾里光束是由 4 个相互独立且参数相同的二维艾里光束组合生成的,每个光束具有自弯曲特性,所以当艾里光束向 z 方向传输时,其光束主瓣在 x - y 平面沿 45° 方向偏移且偏移量相同。

从图 7(c)可以看出,此阵列二维艾里光束光强分布是 4 个主瓣方向都指向阵列中心的二维艾里光束,而且 4 个艾里光束的光强分布、光束强度相同,且和仿真结果一致。

因此,当阵列光束向前传输一段距离之后,这 4 束艾里光束将慢慢向阵列中心融合,最终达到自聚焦的目的。前文已通过仿真验证了阵列二维艾里光束的自聚焦性,下面将通过实验对其自聚焦性进行验证。图 8 为阵列艾里光束的自聚焦过程的实验图。

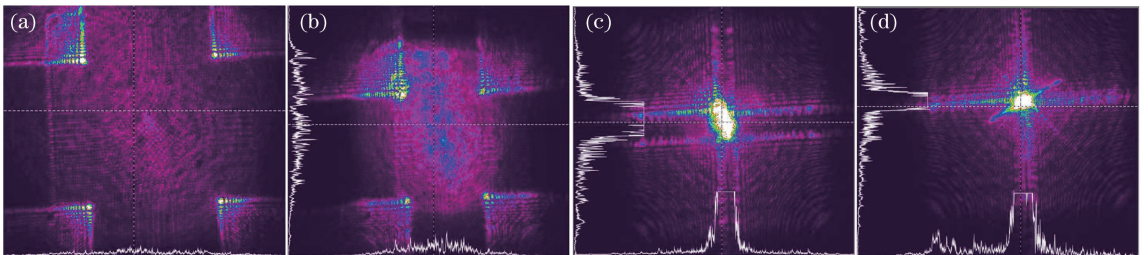


图 8 阵列二维艾里光束的自聚焦过程实验图。(a) $z=0$ mm;(b) $z=100$ mm;(c) $z=180$ mm;(d) $z=250$ mm

Fig. 8 Experimental diagram of self-focusing of two-dimensional array Airy beam.

(a) $z=0$ mm; (b) $z=100$ mm; (c) $z=180$ mm; (d) $z=250$ mm

由图 8 可以看出,图 8(a)是初始界面处即 $z=0$ mm 的光强分布,4 束二维艾里光束主瓣都指向阵列中心;当 $z=100$ mm 时,图 8(b)中的 4 束二维艾里光束逐渐向中心靠拢,但没有融合;当 $z=180$ mm 时,图 8(c)中的 4 束二维艾里光束已经慢慢融合,但其旁瓣之间还有间距,未完全融合;当 $z=250$ mm 时,图 8(d)中的 4 束二维艾里光束已经完全融合,表明阵列二维艾里光束已经完成自聚焦。图 8 所示实验中的自聚焦过程很好地验证了图 3 中模拟仿真的自聚焦过程,证明利用多相位膜片产生的阵列二维艾里光束具有自聚焦性。

4.2 实验验证光斑尺寸对艾里光束自聚焦性的影响

前文通过模拟仿真分析了横向尺度 x_0 对阵列

艾里光束自聚焦性的影响,且已说明 x_0 影响光斑尺寸,以下将通过实验研究阵列艾里光束的光斑大小对自聚焦性的影响。实验中艾里光束的光斑大小是由立方相位膜片中圆形部分占整个相位屏的比例决定的,圆形部分的面积越大,实验产生艾里光束的光斑面积也越大。文中的立方相位膜片通过 Matlab 产生,圆形部分大小通过改变程序中比例系数 η 实现。图 9 为不同比例系数下多相位膜片图。

从图 9 可以看出,随着 η 变大,多相位膜片中的圆形部分逐渐变小,表明用此相位膜片生成的阵列艾里光束的光斑尺寸逐渐缩小。实验中为了验证不同光斑尺寸对阵列艾里光束自聚焦性的影响,将图 9 中的多相位膜片分别加载到实验系统中产生不

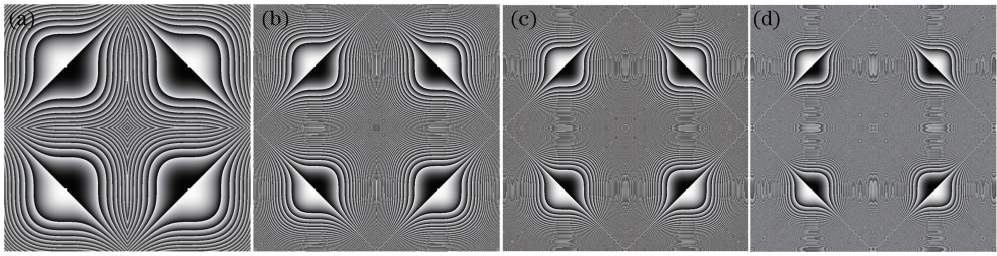


图 9 不同比例系数下的多相位膜片。(a) $\eta=8\ \mu\text{m}$; (b) $\eta=10\ \mu\text{m}$; (c) $\eta=13\ \mu\text{m}$; (d) $\eta=15\ \mu\text{m}$

Fig. 9 Multiphase diaphragms with different scale factors. (a) $\eta=8\ \mu\text{m}$; (b) $\eta=10\ \mu\text{m}$; (c) $\eta=13\ \mu\text{m}$; (d) $\eta=15\ \mu\text{m}$

同大小光斑的阵列艾里光束,最后对比分析不同光斑尺寸的阵列艾里光束的自聚焦性。图 10 为不同相位膜片下的阵列艾里光束的自聚焦过程。

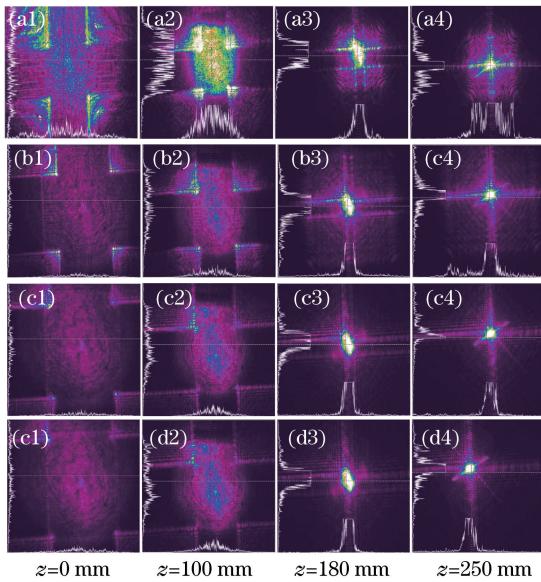


图 10 不同相位膜片下的阵列艾里光束的自聚焦过程。

(a1)~(a4) $\eta=8\ \mu\text{m}$; (b1)~(b4) $\eta=10\ \mu\text{m}$;

(c1)~(c4) $\eta=13\ \mu\text{m}$; (d1)~(d4) $\eta=15\ \mu\text{m}$

Fig. 10 Self-focusing process of the array Airy beam under different phase diaphragms. (a1)-(a4) $\eta=8\ \mu\text{m}$;

(b1)-(b4) $\eta=10\ \mu\text{m}$; (c1)-(c4) $\eta=13\ \mu\text{m}$;

(d1)-(d4) $\eta=15\ \mu\text{m}$

由图 10 可知,随着 η 的增大,阵列艾里光束的光斑尺寸越来越小,光束的强度也越来越低,由此可知,比例系数影响艾里光束的光斑尺寸,即相位膜片中圆形区域的大小决定艾里光束的光斑尺寸。

图 10 中每组图的前 3 幅图都是传播距离分别为 0 mm、100 mm 和 180 mm 时阵列艾里光束的光强分布图,第 4 幅图是阵列艾里光束完成自聚焦时的光强分布图,而且每组图完成聚焦的传播距离不同。分析比较每组图中的前 3 幅图可知,随着光斑尺寸的变小,经过相同传播距离后的阵列艾里光束中每个光束离阵列中心越近,表明其能更快地完成

自聚焦。分析图 10 可知,光斑尺寸越小,阵列艾里光束完成自聚焦的距离越小。比例系数值为 $8\ \mu\text{m}$ 时,阵列艾里光束在 $z=270\ \text{mm}$ 处完成聚焦;而比例系数值为 $15\ \mu\text{m}$ 时,阵列艾里光束在 $z=200\ \text{mm}$ 处完成自聚焦。可以得出,自聚焦阵列艾里光束的聚焦位置是可以控制的,通过改变不同比例系数的相位膜片便可控制阵列艾里光束的自聚焦位置,而且这种控制方式是非机械的,也不用改变实验装置,仅通过计算机变换相位膜片即可。

5 结 论

利用多个二维艾里光束合成了阵列艾里光束,并利用艾里光束的自弯曲性,使阵列艾里光束中每个光束的弯曲轨迹都朝向阵列中心,从而使其具有自聚焦性。通过数值模拟和实验对阵列艾里光束的自聚焦性进行了验证,结果表明,基于二维艾里光束生成的阵列光束具有自聚焦性。由于艾里光束的自弯曲轨迹受横向尺度 x_0 ,即光斑尺寸的影响,笔者通过改变阵列艾里光束的光斑尺寸来改变阵列艾里光束的聚焦位置,随着光斑尺寸的变大,阵列艾里光束聚焦位置越远。

参 考 文 献

- [1] Chen M, Ke X Z. Effect of atmospheric turbulence on the performance of laser communication system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8): 108-114.
陈牧, 柯熙政. 大气湍流对激光通信系统性能的影响研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 108-114.
- [2] Ke X Z, Wang J. Comparison of polarization property of partially coherent beam between propagating along an uplink path and a downlink path in atmospheric turbulence [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(22): 144-151.
柯熙政, 王姣. 大气湍流中部分相干光束上行和下行传输偏振特性的比较[J]. 物理学报, 2015, 64(22): 144-151.

- [3] Ke X Z, Zhang Y. Scintillation of partially coherent beam in atmospheric turbulence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0106001.
柯熙政, 张宇. 部分相干光在大气湍流中的光强闪烁效应[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0106001.
- [4] Ke X Z, Zhang Y. Propagation properties of partially coherent array beams in free space optics system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 100601.
柯熙政, 张雅. 无线光通信系统中部分相干阵列光束的传输特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 100601.
- [5] Tian B G, Zhu W Y, Rao R Z, *et al.* Research progress on propagation of laser array beams in turbulent atmosphere [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2013, 8(2): 81-90.
田宝刚, 朱文越, 饶瑞中, 等. 阵列合成激光束在湍流大气中传输的研究进展[J]. *大气与环境光学学报*, 2013, 8(2): 81-90.
- [6] Efremidis N K, Christodoulides D N. Observation of abruptly autofocusing waves [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(10): 1842-1844.
- [7] Qian Y X, Li D H. Tunable optical bottle beam generated via self-bending Airy beam arrays [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0909002.
钱义先, 李登辉. 自弯曲艾里光束阵列产生的可调局域空心光束[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0909002.
- [8] Zhang Z, Liu J J, Zhang P, *et al.* Generation of autofocusing beams with multi-Airy beams[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(3): 180-185.
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): 180-185.
- [9] Wang X Z. Research on genera of Airy beams and propagation controlled by using spatial light modulator [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
王晓章. 基于相位空间光调制器的艾里光束产生和传输控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [10] Berry M V, Balazs N L. Nonspreading wave packets [J]. *American Journal of Physics*, 1979, 47(3): 264-267.
- [11] Christodoulides D N, Siviloglou G A. Accelerating finite energy Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(8): 979-981.
- [12] Zhang B F. Properties and applications of general Airy-Like beams [D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
张柏富. Airy-Like 光束的性质及应用[D]. 南京: 南京大学, 2012.