

## 衰减因子和横向尺度对 Airy 光束三大特性的影响

柯熙政, 宋强强, 王 姣

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** Airy 光束是一种特殊的无衍射光束, 不仅具有自恢复和无衍射性质, 还具有其他无衍射光束不具备的自弯曲性质。研究了 Airy 光束的无衍射、自弯曲和自恢复的演化过程, 讨论了不同衰减因子  $a$  和横向尺度  $x_0$  对 Airy 光束三大特性的影响。研究表明: 当横向尺度  $x_0$  不变时, Airy 光束的无衍射传播距离随着衰减因子  $a$  的增大而减小, 衰减因子  $a$  对自弯曲没有任何影响, 自恢复痊愈距离随着衰减因子  $a$  增大而减小。当衰减因子  $a$  不变时, 无衍射传输距离、自弯曲的偏移量、自恢复痊愈距离都随着横向尺度  $x_0$  的增大而增大。通过对比横向尺度  $x_0$  和衰减因子  $a$  对 Airy 光束三大特性的影响, 研究发现衰减因子  $a$  相比横向尺度  $x_0$  对 Airy 光束三大特性的影响较小。

**关键词:** Airy 光束; 衰减因子; 横向尺度; 三大特性

**中图分类号:** TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0922003

## Influence of decay factor and scale in the transverse on the three characteristics of Airy beam

Ke Xizheng, Song Qiangqiang, Wang Jiao

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Airy beam is a distinctive non-diffraction, which not only has properties of self-healing and non-diffraction, but also has the merit of self-bending that other non-diffraction beams do not have. The evolution of Airy beam's non-diffraction, self-bending and self-healing was researched. The influence of different decay factor  $a$  and scale in the transverse  $x_0$  on the three characteristics of Airy beam was discussed. The research shows that the non-diffracting propagation distance of Airy beam will decrease with the increase of decay factor  $a$  when the scale in the transverse  $x_0$  is constant, and the decay factor has no impact on self-bending. It also manifests that the recovery distance of self-bending will decrease with the increase of decay factor  $a$ . When the decay factor  $a$  is constant, the distance of non-diffracting transmission, the offset of the self-bending as well as the healing distance of self-healing increases in proportion to the scale in the transverse  $x_0$ . By comparing the effects of scale in the transverse  $x_0$  and decay factor  $a$  on the three characteristics of Airy beam, it is found that the influence of decay factor  $a$  on the three properties of Airy beam is smaller than that of scale in the transverse  $x_0$ .

**Key words:** Airy beam; decay factor; scale in the transverse; three characteristics

收稿日期: 2017-01-10; 修订日期: 2017-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(61377080); 陕西省重点产业创新链项目(2017DCXL-GY-06-01)

作者简介: 柯熙政(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事无线激光通信方面的研究。Email: xzke@263.net

## 0 引言

无线激光通信是不需要任何有线传输媒介的通信方式,具有信息容量大、频带宽、安全保密等优点。无线激光通信中激光器发出的光束为高斯光束,高斯光束对衍射没有任何的抑制能力,随着传输距离的增加光斑面积变大,使得接收面能量利用率低,由于激光束受到大气湍流效应的影响,传输过程中的激光强度、频率和相位通常在空间与时间维度随机起伏。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<sup>[1]</sup>,所以用一种无衍射、自恢复的光束进行更远距离的激光通信具有很大应用价值。无衍射光束是自由空间标量波动方程的一组解,它的横向强度分布不随传播距离的增加而变化<sup>[2]</sup>。

Airy 光束是一种无衍射光束,它的基本特性之一是自恢复,当 Airy 光束一部分被遮挡后经过一定距离的传输后能够自恢复,这种自恢复具有一定的稳健性<sup>[3]</sup>,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<sup>[4]</sup>;其另一个特性是自弯曲,利用该特性产生的环形 Airy 光束在大气湍流中传输时扰动漂移量小于 Airy 光束和高斯光束<sup>[5]</sup>。所以 Airy 光束作为信息载体在远距离大气通信具有重要的应用潜力<sup>[6]</sup>。1979 年 Berry<sup>[2]</sup>等人发现 Airy 波包是满足薛定谔方程的一个波包解,并且认为一维薛定谔方程具有唯一的无衍射解,但 Airy 波包具有无限大的能量,在实际中无法实现。直到 2007 年, Siviloglou 等人发现在 Airy 波包上加一个指数衰减函数仍然满足薛定谔方程,并且在实验上第一次产生了“截断”后的 Airy 光束<sup>[7]</sup>,经过“截断”后的 Airy 光束具有近似的无衍射性,在一定的距离内可认为其具有无衍射性。自此 Airy 光束得到了飞速发展,对其特殊特性的研究更是热点<sup>[8-9]</sup>。Airy 光束的光场分布是非对称的,它在向前传播时能够自由加速弯曲,即 Airy 光束的主瓣沿着一条抛物线形状的轨迹来传输。2008 年 Broke 等人从理论上和实验上都证明了 Airy 光束在传播过程中具有自愈的特性<sup>[10]</sup>。Airy 光束的自恢复性描述的是,当 Airy 光束在传输过程中受到障碍物的遮挡后,传输一定距离之后会恢复到遮挡之前的样子,因此 Airy 光束具

有很强的恢复能力,当 Airy 光束用于激光通信,可以预期其自恢复性对于抑制大气湍流将有很好的效果。

以往人们只是研究了 Airy 光束实验的产生以及无衍射、自弯曲、自恢复这三大特性的存在性,2015 年程振等人研究了 Airy 光束衰减因子  $a$  和横向尺度  $x_0$  对无衍射距离的影响<sup>[11]</sup>,但衰减因子  $a$  和横向尺度  $x_0$  对光束自弯曲和自恢复的影响却很少有人涉及。文中系统研究了衰减因子  $a$  和横向尺度  $x_0$  对 Airy 光束无衍射传播距离、自弯曲偏移量、自恢复痊愈距离的影响。对于 Airy 光束的自恢复特性,将光束新恢复的主瓣强度与旁瓣强度相等作为自恢复痊愈的标准,此时的光束传播距离即为 Airy 光束自恢复痊愈的需要距离。Airy 光束的主瓣宽度  $w$  与  $x_0$  成正比<sup>[12]</sup>,联系实际的物理意义,横向尺度  $x_0$  对 Airy 光束三大特性的影响在实验中即为光束主瓣宽度对 Airy 光束三大特性的影响。

## 1 理论分析

首先从自由空间(1+1)维傍轴波动方程开始分析,平面波电场波包的动态传输方程为<sup>[2]</sup>:

$$i \frac{\partial \varphi}{\partial \zeta} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial s^2} = 0 \quad (1)$$

式中: $\varphi$  为电场包络; $s=x/x_0$  为无量纲横向坐标; $x_0$  为横向尺度; $\zeta=z/k_0 x_0^2$  为归一化的纵向传输距离(相对于瑞利距离), $k_0=2\pi n/\lambda$  为波数, $\lambda$  为真空中的波长。由公式(1)可以得到 Airy 非色散解<sup>[2]</sup>:

$$\varphi(s, \zeta) = \text{Ai} \left( s - \left( \frac{\zeta}{2} \right)^2 \right) \exp \left( i s \frac{\zeta}{2} - i \left( \frac{\zeta^3}{12} \right) \right) \quad (2)$$

其中,  $\text{Ai}(\cdot)$  为 Airy 函数,如下式:

$$\text{Ai}(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \cos \left( \frac{1}{3} t^3 + xt \right) dt \quad (3)$$

公式(2)初始窗口处即  $\zeta=0$  处的 Airy 光束的振幅分布函数可写为  $\varphi(s, 0) = \text{Ai}(s)$ 。公式(2)是公式(1)的解,因此公式(2)的物理意义就表征了一个描述粒子动力学运动特性的波包,所以公式(2)为 Airy 波包。在光学领域,若一束光的波前在空间域以 Airy 函数形式分布,则被称为 Airy 光束。

在数学上,通常在初始窗口给无限能量 Airy 光束乘一个指数衰减函数进行“截断”,使 Airy 函数

具有实际意义(即为有限能量 Airy 光束),表示如下<sup>[13]</sup>:

$$\varphi(s, \zeta=0) = \text{Ai}(s) \exp(as) \quad (4)$$

式中:  $a$  为衰减因子,且  $a \ll 1$ 。将公式(4)代入公式(1)得到如下有限能量的 Airy 函数解<sup>[14]</sup>:

$$\varphi(s, \zeta) = \text{Ai} \left[ s - \left( \frac{\zeta}{2} \right)^2 + ia\zeta \right] \times \exp \left( as - \left( \frac{a\zeta^2}{2} \right) - i \left( \frac{\zeta^3}{12} \right) + i \left( \frac{a^2 \zeta}{2} \right) + i \left( \frac{s\zeta}{2} \right) \right) \quad (5)$$

在这个(1+1)维的解中,  $s$  代表变量  $x$  或  $y$ , 因为  $x, y$  在傍轴波动方程中的地位是相等的, 所以二维 Airy 光束的数学表达可以由两个分别以  $x, y$  为变量的一维函数解相乘得到<sup>[14]</sup>:

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, z) &= \varphi(x, z) \times \varphi(y, z) = \\ & \text{Ai} \left[ \frac{x}{x_0} - \left( \frac{z}{2z_0} \right)^2 + ia \frac{z}{z_0} \right] \times \text{Ai} \left[ \frac{y}{y_0} - \left( \frac{z}{2z_0} \right)^2 + ia \frac{z}{z_0} \right] \times \\ & \exp \left( a \frac{x}{x_0} - \frac{a}{2} \left( \frac{z}{z_0} \right)^2 - i \frac{1}{12} \left( \frac{z}{z_0} \right)^3 + i \frac{a^2}{2} \left( \frac{z}{z_0} \right) + i \left( \frac{1}{2} \frac{x}{x_0} \frac{z}{2z_0} \right) \right) \times \\ & \exp \left( a \frac{y}{y_0} - \frac{a}{2} \left( \frac{z}{z_0} \right)^2 - i \frac{1}{12} \left( \frac{z}{z_0} \right)^3 + i \frac{a^2}{2} \left( \frac{z}{z_0} \right) + i \left( \frac{1}{2} \frac{y}{y_0} \frac{z}{2z_0} \right) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $y_0$  与  $x_0$  意义相同, 是  $y$  方向的横向尺度,  $y_0 = kx_0^2$  为归一化的传播距离。

## 2 数值模拟

### 2.1 无衍射传输距离

Airy 光束是经过“截断”的有限能量 Airy 光束, 在一定的传输距离内满足无衍射性, 在这段距离内 Airy 光束主瓣大小基本不变, 但随着传播距离的继续增大, Airy 光束主瓣由于衍射开始和旁瓣慢慢融合, 使整个光斑逐渐变大, 最终衍射成高斯光束, 光束传播过程如图 1 所示。图 1 中 Airy 光束的衰减因子  $a=0.05$ , 横向尺度  $x_0=10$  mm, Airy 光束的波长  $\lambda=632.8$  nm(后文 Airy 光束波长均为此波)。在 Airy 光束向  $z$  方向传输过程中, 分别取  $z=0, 6, 12$  km 处  $x-y$  面的光强图, 如图 1(a)~(c)所示。

对比图 1(a)和图 1(b)可知, 在  $z=6$  km 之前, Airy 光束能保持很好的无衍射性, 其主瓣基本没变, 但其主瓣位置有所偏移, 这也说明了 Airy 光束的无衍射和自弯曲性。对比图 1(b)和图 1(c)可知, 当

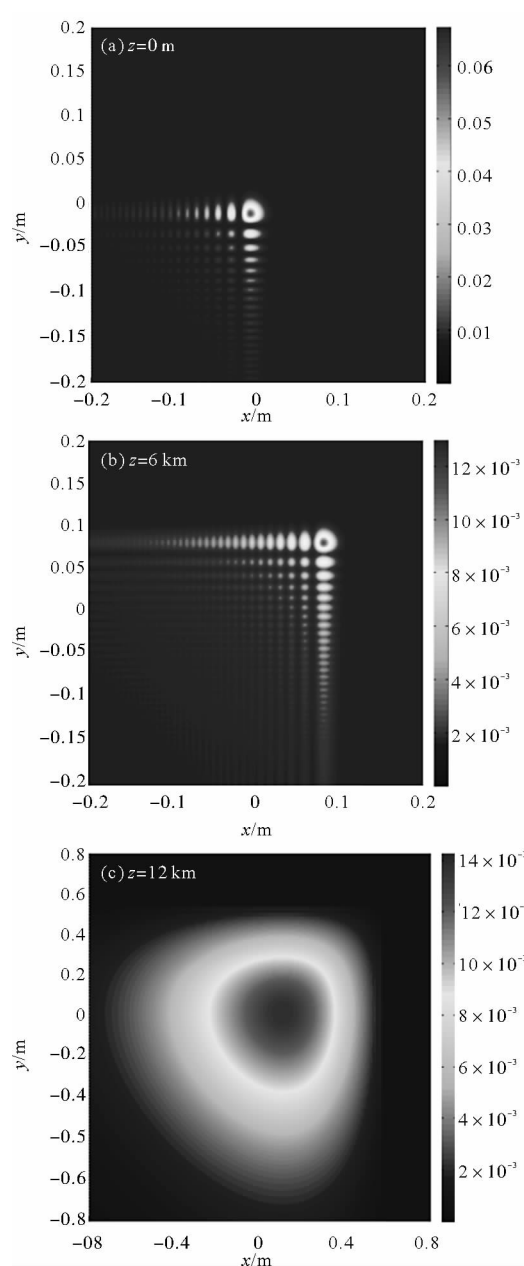


图 1 Airy 光束不同传输距离强度分布图  
Fig.1 Intensity distribution of Airy beam in different transmission distance

光束传播到 12 km 时, Airy 光束衍射成高斯光束。这个过程验证了经过“截断”后的 Airy 光束是近似无衍射的, 只在有限的传播距离内可以作为无衍射光束, 而无衍射传播距离的大小受 Airy 光束的衰减因子  $a$  和横向尺度  $x_0$  的影响, 当衰减因子  $a$  和横向尺度  $x_0$  的值确定时, Airy 光束的无衍射距离也就确定。下面分别讨论不同衰减因子  $a$  和横向尺度  $x_0$  对 Airy 光束无衍射传播距离的影响。

2.1.1 衰减因子  $a$  对无衍射距离的影响

为了探讨不同衰减因子  $a$  对无衍射传输距离的影响,选取 Airy 光束横向尺度  $x_0=5$  mm,在光束传输过程中不变,分别计算不同衰减因子  $a$  下 Airy 光束的无衍射传输距离。Airy 光束在传播过程中的中心波瓣的半峰全宽保持基本不变的距离,即为沿直线传播的 Airy 光束近似无衍射传输的距离,也可以将中心波瓣强度衰减到 18% 处的传输距离作为 Airy 光束近似无衍射的传输距离<sup>[12]</sup>,文中选取后者作为判别无衍射距离的标准。由公式(3)可知,Airy 光束的衰减因子  $a \ll 1$ ,所以取  $0 < a \leq 0.4$ ,当衰减因子  $a > 0.4$  时,Airy 光束的衍射很强,传输距离很短。

计算了当衰减因子  $a$  分别为 0.01、0.05、0.1、0.15、0.2、0.3、0.4 时,Airy 光束主瓣初始强度为 0.077、0.065、0.054、0.046、0.038、0.029、0.022,对应主瓣强度衰减到 18% 的无衍射传输距离  $z$  分别为 3 284、1 531、1 124、991、902、821、790 m。根据计算结果拟合出衰减因子  $a$  与 Airy 光束初始强度  $\varphi^2$ 、近似无衍射传输距离  $z$  的关系曲线如图 2 所示。由图 2 可知,Airy 光束的初始强度  $\varphi^2$  随着衰减因子  $a$  的增加而减小,说明衰减因子  $a$  越大,对原始 Airy 光束的“截断”越严重,导致 Airy 光束总能量减小。随着衰减因子  $a$  的增大,旁瓣和尾部能量减少,导致流向主瓣的能量减少,所以 Airy 光束的无衍射距离由于旁瓣和尾部能量变小而减小。

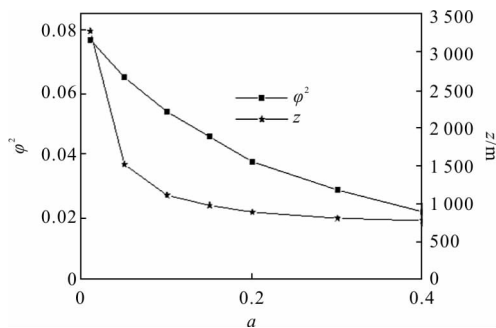


图 2 衰减因子  $a$  对初始强度和传输距离的影响  
Fig.2 Influence of decay factor  $a$  on the initial intensity and transmission distance of non-diffraction

2.1.2 横向尺度  $x_0$  对无衍射距离的影响

由公式(2)可以看出,横向尺度  $x_0$  和归一化的传输距离  $\zeta=z/k_0x_0^2$  之间有确定的关系。实验中 Airy

光束的衰减因子  $a=0.05$ ,分别计算不同横向尺度  $x_0$  下的无衍射传输距离,横向尺度  $x_0$  在 0~20 mm 之间时对应的 Airy 光束在  $z=0$  m 时的初始光束强度及其衰减到 18% 时的传输距离  $z$  的关系曲线如图 3 所示。

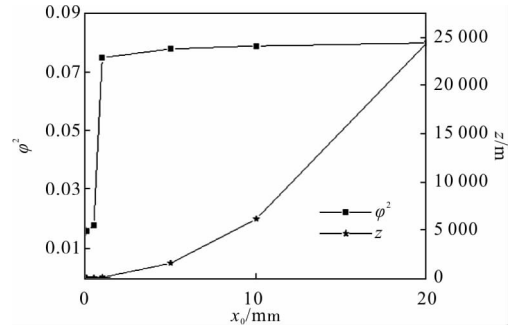


图 3 横向尺度  $x_0$  对初始强度及无衍射传输距离的影响  
Fig.3 Influence of scale in the transverse  $x_0$  on the initial intensity and transmission distance of non-diffraction

横向尺度  $x_0$  为 0.1、0.5、0.7、1、5、10、20 mm 时的初始强度为 0.016、0.018、0.039、0.075、0.078、0.079、0.079。通过分析 Airy 光束光场分布,当横向尺度  $x_0$  小于 2 mm 时,由于横向尺度  $x_0$  太小,导致 Airy 光束的光场并不完整,所以当横向尺度  $x_0$  小于 2 mm 时,随着  $x_0$  的增加,Airy 光束的光场趋于完整,Airy 光束的初始强度会急剧上升。当横向尺度  $x_0$  大于 2 mm 时,Airy 光束光场分布完整,随着横向尺度  $x_0$  的增大,Airy 光束光斑逐渐变大,其光场强度基本不变,这也验证了横向尺度  $x_0$  影响 Airy 光束的主瓣宽度。初始强度衰减到 18% 处的传输距离  $z$  分别为 0.243、16.8、35.1、55、1 538、6 137、24 512 m。横向尺度  $x_0$  从 0.1 mm 增加到 20 mm 时,Airy 光束的近似无衍射距离从 0.243 m 增加到 24 512 m,表明横向尺度  $x_0$  越大,Airy 光束的近似无衍射传输距离越大,而且横向尺度  $x_0$  对其无衍射距离的影响大于衰减因子  $a$ 。

2.2 自弯曲

由公式(5)中  $\frac{x}{x_0} - \left(\frac{z}{2z_0}\right)^2$  和  $\frac{y}{y_0} - \left(\frac{z}{2z_0}\right)^2$  可以得到 Airy 光束的光束主瓣传播规律。在  $x$ 、 $y$  平面内,随着传播距离  $z$  的增加,其在  $x$ 、 $y$  平面内的位置满足如下关系<sup>[14]</sup>:

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

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

$x$ 、 $y$  对于变量  $z$  的轨迹是一条抛物线, 这意味着当 Airy 光束沿  $z$  方向传播时, 在  $x$ - $y$  平面内, 其光束主瓣沿抛物线运动。这种传播特性称作 Airy 光束的自弯曲性质。

当二维 Airy 光束的横向尺度  $x_0$  与  $y_0$  相等时, Airy 光束向前传播, 其光束主瓣在  $x$ - $y$  平面沿着直线  $x=y$  的方向偏移, 如图 4(a) 所示。  $x_0 \neq y_0$ , 其不沿  $x=y$  方向, 如图 4(b) 所示。

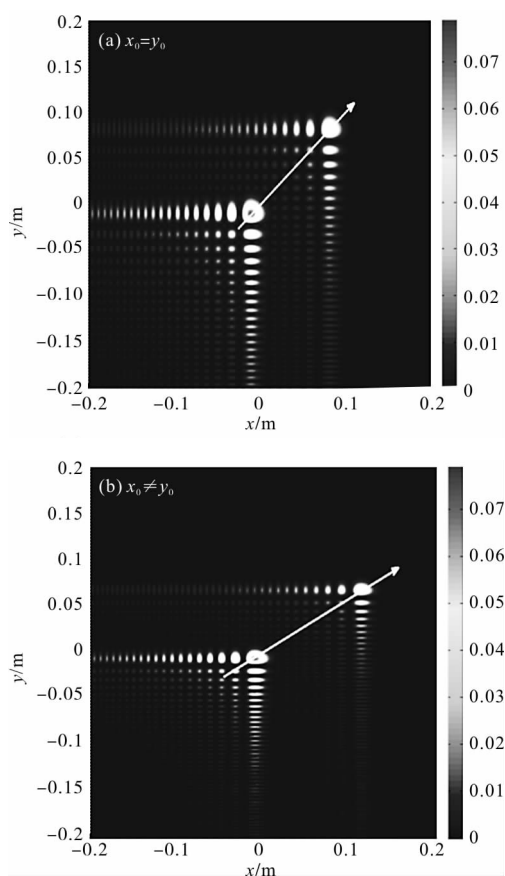


图 4 二维 Airy 光束主瓣偏移轨迹

Fig.4 2D Airy beam main lobe migration trajectory

文中取  $x_0=y_0$  的情况, 所以文中横向尺度  $x_0$  和  $y_0$  等价。由公式(6)可知, 衰减因子  $a$  并没有影响 Airy 光束的自弯曲轨迹, 但横向尺度  $x_0$  却影响 Airy 光束的自弯曲。下面验证衰减因子  $a$  和横向尺度  $x_0$  对 Airy 光束自弯曲的影响。

### 2.2.1 衰减因子 $a$ 对自弯曲的影响

为了验证衰减因子  $a$  对自弯曲没有影响, Airy

光束的横向尺度  $x_0$  为 10 mm, 计算固定传输距离  $z$  在不同衰减因子  $a$  时光束主瓣的偏移量。取  $z=4\ 000$  m, 衰减因子  $a$  改变时的 Airy 光束自弯曲的偏移量恒为 0.014 m。根据具体的计算结果拟合出衰减因子  $a$  与偏移量  $x$  的关系曲线如图 5 所示。图 5 验证了公式(6)中的结果, 衰减因子  $a$  的改变不影响 Airy 光束的自弯曲。

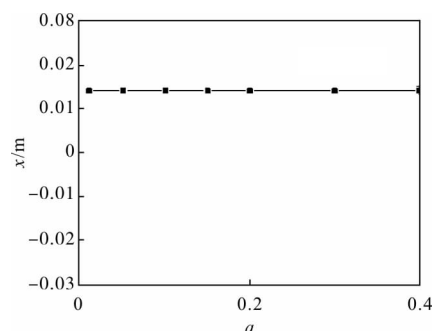


图 5 衰减因子  $a$  对自弯曲影响

Fig.5 Influence of decay factor  $a$  on the self-bending

### 2.2.2 横向尺度 $x_0$ 对自弯曲的影响

传输轨迹的表达式为:  $s-(z/2k_0x_0^2)^2$ , Airy 光束的传输轨迹受横向尺度的影响, 为了探究不同横向尺度  $x_0$  对自弯曲的影响, 取 Airy 光束的衰减因子  $a=0.05$ 。然后研究横向尺度  $x_0$  分别在 1、3、5、7、9 mm 时 Airy 光束在衰减成高斯光束之前主瓣位置的偏移量。  $x_0=1$  mm 时, Airy 光束在传输到  $z=100$  m 时其光束主瓣偏移量  $x=0.024$  m, 而当传输距离继续增大到 120 m 时, 其衍射成高斯光束, 其高斯光束中心在  $x=0.009$  m 处, 传播距离的继续增大时, 衍射成高斯光束的光束中心位置不会再变化。  $x_0=3$  mm 传输到  $z=900$  m 时光束主瓣偏移量  $x=0.073$  m,  $z=1\ 000$  m 时衍射成高斯光束且其光束主瓣偏移量  $x=0.033$  m。  $x_0=5$  mm 传输到  $z=2\ 300$  m 时光束主瓣偏移量  $x=0.101$  m,  $z=2\ 800$  m 时衍射成高斯光束且其光束主瓣偏移量  $x=0.047$  m。  $x_0=7$  mm 传输到  $z=5\ 500$  m 时光束主瓣偏移量  $x=0.216$  m,  $z=7\ 000$  m 时衍射成高斯光束且其光束主瓣偏移量  $x=0.075$  mm。  $x_0=9$  mm 传输到  $z=9\ 000$  m 时光束主瓣偏移量  $x=0.272$  mm, 时衍射成高斯光束且其光束主瓣偏移量  $x=0.093$  m。通过上述数据可以得出不同横向尺度  $x_0$  在不同传播距离  $z$  处光束主瓣在  $x=y$  方向的偏移量如图 6 所示。

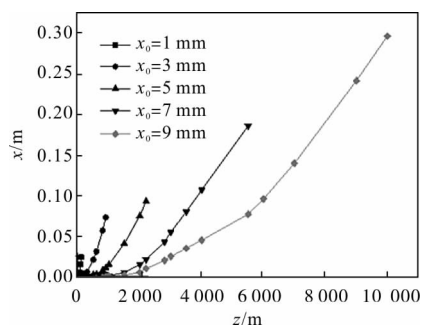


图 6 横向尺度  $x_0$  对 Airy 光束自弯曲的影响

Fig.6 Influence of scale in the transverse  $x_0$  on the self-bending

不同横向尺度  $x_0$  下的 Airy 光束的无衍射传输距离不同,而且差别很大,又因为只有无衍射 Airy 光束具有自弯曲性质,所以在不同横向尺度  $x_0$  下,光束主瓣的自弯曲只在各自的无衍射区间。从图 6 中可以看出,在对应横向尺度  $x_0$  的无衍射距离范围内,横向尺度  $x_0$  越大,其自弯曲的偏移量逐渐变大,而且当  $x_0=9$  mm 时,传播到 9 km 时其自弯曲的偏移量达到 27 cm,而  $x_0=1$  mm 时其偏移量仅为 2.4 cm。光束主瓣越大的 Airy 光束整个光束能量越高,保持无衍射的能力非常好,因此主瓣偏移量越大。

### 2.3 自恢复

Airy 光束在外界干扰的情况下,主瓣被遮挡,在向前传播一段距离后通过内部能量流动,主瓣又重新出现了,形成了完整的 Airy 光束,恢复过程如图 7 所示。图 7 中 Airy 光束的横向尺度  $x_0=10$  mm,衰减因子  $a=0.05$ 。图 7 (a) 是  $z=0$  m 处被遮挡了主瓣的 Airy 光束,图 7(b)是传播到  $z=800$  m 处的 Airy 光束,主瓣已经恢复了一部分,图 7(c)是传播到  $z=1200$  m 处的 Airy 光束,主瓣自恢复了。

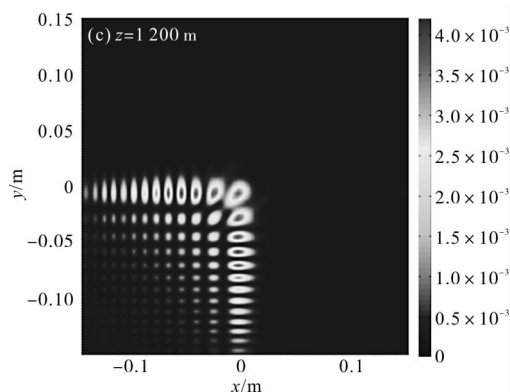
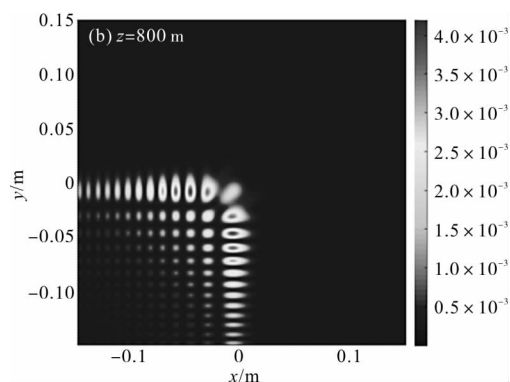
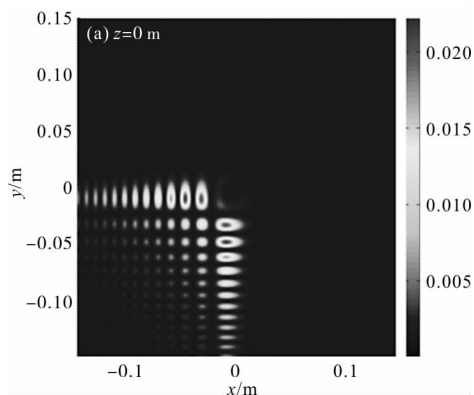


图 7 Airy 光束自恢复过程

Fig.7 Airy beam self-healing process

为了更好地研究 Airy 光束的自愈性质,计算它的电磁场能量流密度,即坡印廷矢量,通过波印廷矢量来分析 Airy 光束传输过程中内部能量流动的方向<sup>[15]</sup>。波印廷矢量的定义如下:

$$\vec{S} = \left( \frac{C}{4\pi} \right) \vec{E} \times \vec{B} \quad (9)$$

式中: $C$ 为光速; $\vec{E}$ 为电场矢量分布; $\vec{B}$ 为磁场矢量分布。根据电磁场的洛伦兹定理,可计算出时间平均的波印廷矢量:

$$\vec{S} = \vec{S}_z + \vec{S}_\perp = \frac{1}{2\eta_0} |\varphi|^2 \zeta + \frac{i}{4\eta_0 k} [\varphi \nabla_\perp \varphi^* - \varphi^* \nabla_\perp \varphi] \quad (10)$$

式中: $\vec{S}_z$ 为波印廷矢量的  $z$  轴分量; $\vec{S}_\perp$ 为波印廷矢量的横向分量; $\nabla_\perp$ 为横向场求旋度; $\eta_0$ 为自由空间的阻抗,其中  $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ 。公式(9)中的第一项代表 Airy 光束在传输方向上的能量流动方向,第二项代表在横向上的能量流动方向。

图 8 给出了 Airy 光束主瓣被挡住时和传播一段距离后的横向波印廷矢量,图中白色箭头的指向表示能量流动方向。在主瓣被遮挡时,旁瓣的能量

向主瓣方向流动,在传播一段距离后,由于旁瓣的能量注入到主瓣当中,主瓣逐渐恢复。从图中能流方向可以解释 Airy 光束的自愈性质。Airy 光束的主瓣被遮挡后,由于旁瓣的能量逐渐向主瓣流动,主瓣会逐渐再“成形”直到恢复原来之前的样子。

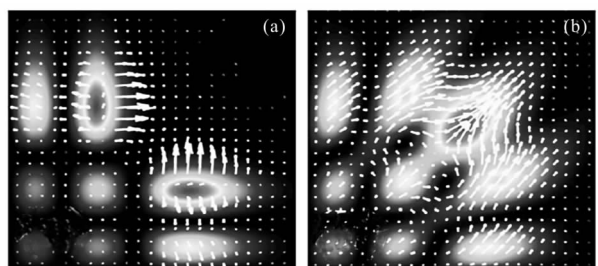


图 8 Airy 光束的能量流动<sup>[15]</sup>  
Fig.8 Airy beam energy flow<sup>[15]</sup>

由于 Airy 光束的衰减因子  $a$  影响光束整体的能量,而 Airy 光束的自愈主要靠旁瓣和尾部能量流入,衰减因子  $a$  的大小会对自愈的效果产生影响。而横向尺度  $x_0$  决定整个光束光斑大小,障碍物对光束的遮挡情况与光束光斑大小有着密切的关系,所以横向尺度  $x_0$  的大小也会对 Airy 光束的自愈产生影响。为了研究衰减因子  $a$  以及横向尺度  $x_0$  是否对 Airy 光束的自愈有影响,将主瓣强度恢复到与旁瓣强度一致时作为 Airy 光束恢复痊愈的标准。

### 2.3.1 衰减因子 $a$ 对自愈的影响

为了验证衰减因子  $a$  对自愈的影响,取 Airy 光束的横向尺度  $x_0=5$  mm, 衰减因子  $a$  分别是 0.01、0.05、0.1、0.15、0.2、0.3、0.4 时,Airy 光束自愈痊愈需要的距离  $z$  分别为 330、325、312、302、290、285、281。根据具体的计算结果拟合出衰减因子  $a$  与需要多长传播距离才能恢复痊愈的关系曲线如图 9 所示。

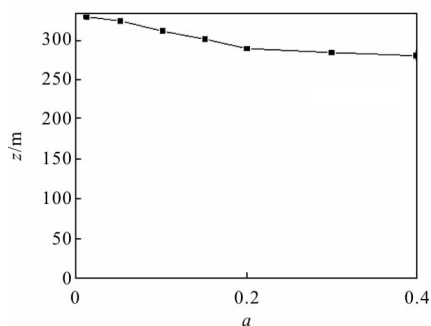


图 9 衰减因子  $a$  对自愈的影响  
Fig.9 Influence of decay factor  $a$  on the self-healing

从图 9 中可以看出,衰减因子  $a$  从 0.01~0.4 变化时 Airy 光束的自愈痊愈的距离逐渐减小,但变化区间大小仅为 49 m, 相对于其无衍射传输距离 3 284~790 m 的范围区间,衰减因子  $a$  对 Airy 光束的自愈影响作用较小,原因在于衰减因子虽然会削弱整个光束的能量,但衰减因子  $a$  越大,主要是对 Airy 光束离主瓣较远的旁瓣和尾部削弱比较大,而对离主瓣较近的主瓣和旁瓣影响较小。在 Airy 光束自愈过程中,为主瓣自愈提供能量的是靠近主瓣附近的旁瓣和尾部光斑,所以衰减因子  $a$  的改变对 Airy 光束自愈影响较小。

### 2.3.2 横向尺度 $x_0$ 对自愈的影响

为了探究横向尺度  $x_0$  对自愈的影响,选取 Airy 光束的衰减因子  $a=0.05$ ,分别测量不同横向尺度  $x_0$  下 Airy 光束自愈痊愈需要的传播距离  $z$ 。横向尺度  $x_0$  分别为 0.1、0.5、0.7、1、2、10 mm 时 Airy 光束自愈痊愈的传播距离  $z$  分别为 1、35、95、170、312、580、1 100 m。根据上述计算结果拟合出横向尺度  $x_0$  与需要多大传播距离才能自愈痊愈的关系曲线如图 10 所示。

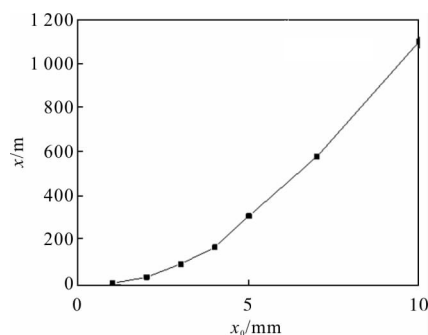


图 10 横向尺度  $x_0$  对自愈的影响  
Fig.10 Influence of scale in the transverse  $x_0$  on the self-healing

通过图 10 可知,随着横向尺度  $x_0$  的增大,Airy 光束自愈痊愈需要传播的距离  $z$  也在不断增大。这种趋势的原因在于随着横向尺度  $x_0$  的增大,Airy 光束的光束主瓣也随之变大,被遮挡的光束主瓣越大,便需要更多的能量才能恢复到以前的状态,所以需要更远的传播距离才能使 Airy 光束自愈痊愈。

## 3 结论

文中通过仿真计算研究了不同衰减因子  $a$  和横向尺度  $x_0$  对 Airy 光束的无衍射距离、自弯曲、自愈

复的影响。将 Airy 光束主瓣强度衰减到最大强度的 18% 处的传输距离作为 Airy 光束无衍射传播的距离,对于 Airy 光束的自恢复,将主瓣强度恢复到与最近旁瓣强度相同时的传输距离作为 Airy 光束的自恢复痊愈需要的传输距离,通过仿真计算得到以下结论:

(1) 对于 Airy 光束的无衍射传输距离,随着衰减因子  $a$  的变大,Airy 光束整体能量被削减变大,尤其尾翼削减更严重,导致流向光束主瓣能流减少,所以 Airy 光束的无衍射距离随着衰减因子  $a$  的增大而减小,而随着横向尺度  $x_0$  的增大,整个 Airy 光束光斑变大,能量增大,所以随着横向尺度  $x_0$  的增大,Airy 光束的无衍射距离变大。

(2) 对于 Airy 光束的自弯曲,衰减因子  $a$  对其没有任何影响,但自弯曲的偏移量随着横向尺度  $x_0$  的增大而增大,由于横向尺度  $x_0$  越大的 Airy 光束,保持无衍射的能力越强,其自弯曲的偏移量越大。

(3) 对于 Airy 光束的自恢复,随着衰减因子  $a$  变大,Airy 光束的自恢复痊愈需要的传输距离逐渐变小,但变化很小,这是因为衰减因子  $a$  变大时对 Airy 光束尾部的削弱很大,而对离主瓣很近的旁瓣削弱很小,这部分旁瓣也是给主瓣提供能量的部分,所以衰减因子  $a$  对 Airy 光束的自恢复影响不大。而随着横向尺度  $x_0$  的变大,主瓣变大,占整个光束的能量比更高,当主瓣被遮挡后,其需要更远的距离进行恢复,所以随着横向尺度  $x_0$  的变大,Airy 光束的自恢复痊愈需要的传输距离变大。

综上所述,Airy 光束的无衍射传播距离、自恢复痊愈距离随着衰减因子  $a$  的增大而减小,衰减因子  $a$  对自弯曲没有任何影响。无衍射传输距离、自弯曲的偏移量、自恢复痊愈距离都随着横向尺度  $x_0$  的增大而增大。通过对比衰减因子  $a$  和横向尺度  $x_0$  对无衍射距离和自恢复痊愈距离影响可知,横向尺度  $x_0$  对无衍射距离和自恢复痊愈距离的影响要大于衰减因子  $a$ 。利用上述性质,当研究者利用高斯光束通过空间光调制器产生 Airy 光束时,可以控制 Airy 光束无衍射传输的距离或让 Airy 光束传输多长距离后刚好自恢复痊愈,方法是通过调节高斯光束光斑大小来改变横向尺度  $x_0$ ,从而对 Airy 光束的特性进行粗调节,然后通过改变加载在空间光调制

器的相位膜片的衰减因子  $a$  进行精调节以达到精确的距离,这极大地增加了 Airy 光束的灵活性,也扩展了 Airy 光束的应用。

#### 参考文献:

- [1] Chen Mu, Ke Xizheng. Effect of atmospheric turbulence on the performance of laser communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0822009. (in Chinese) 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): 0822009.
- [2] Berry M V, Balazs N L. Nonspreading wave packets[J]. *Am J Phys*, 1979, 47(3): 264-267.
- [3] Yang Bin, Qin Yali, Liu Xian, et al. Self-healing property of two-dimensional Airy beams[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(7): 070501. (in Chinese) 杨斌,覃亚丽,刘鲜,等. 二维艾里光束的自愈特性[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(7): 070501.
- [4] Efremidis N K, Christodoulides D N. Abruptly autofocusing waves[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(23): 4045-4047.
- [5] Wang Xiaozhang, Tang Feng, Yuan Mengjie, et al. Experimental simulation of circular-Airy beam drift in atmospheric turbulence[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 0813001. (in Chinese) 王晓章,唐峰,原萌捷,等. 实验模拟环形艾里光束在大气扰动中的光束漂移[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0813001.
- [6] Chen Chunyi, Yang Huamin, Mohsen Kavehrad, et al. Propagation of radial Airy array beams through atmospheric turbulence [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 52: 106-114.
- [7] Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, et al. Observation of accelerating Airy beams [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(21): 213901-213904.
- [8] Chu X, Zhou G, Chen R. Analytical study of the self-healing property of Airy beams [J]. *Physical Review A*, 2012, 85(1): 013815.
- [9] Xu Jia, Liu Juan, Xie Jinghui, et al. Reviews of recent researches on Airy beams [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(7): 070501. (in Chinese) 徐佳,刘娟,谢敬辉,等. Airy 激光束理论及应用的最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(7): 070501.
- [10] Broky J G, Siviloglou G A, Dogariu A, et al. Self-healing properties of optical Airy beams [J]. *Opt Express*, 2008, 16(17): 12880-12891.
- [11] Cheng Zhen, Chu Xingchun, Zhao Shanghong, et al.



- Propagation characteristics in the far-field and evolution regular of Airy beam [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 2906–2911. (in Chinese)  
程振, 楚兴春, 赵尚弘, 等. Airy 光束的远场特性及其演化规律[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 2906–2911.
- [12] Shi Yaoyao, Wu Tong, Liu Youwen, 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. Airy 光束自弯曲性质的控制[J]. 光子学报, 2013, 42(12): 1401–1407.
- [13] Siviloglou G A, Christodoulides D N. Accelerating finite energy Airy beams[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(8): 979–981.
- [14] Khilo N A, Belyi V N, Kazak N S, et al. Acoustooptic refraction-influenced generation of tunable incomplete Airy beams[J]. *J Opt*, 2014, 16(8): 085702.
- [15] Wang Yaqian, Ren Zhijun, Li Xiaodong. Poynting vector and angular momentum of accelerating quad Airy Beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1226001. (in Chinese)  
王雅倩, 任志君, 李晓东. 加速四艾里光束的坡印亭矢量及角动量研究[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1226001.