

## 大气非线性自聚焦效应对艾里光束上行大气传输的影响

罗静, 季小玲\*, 李晓庆\*\*

四川师范大学物理与电子工程学院, 四川 成都 610068

**摘要** 采用数值模拟方法研究了大气非线性自聚焦效应对艾里光束上行大气传输特性和光束质量的影响, 结果表明: 大气自聚焦效应随着艾里光束指数截断因子的增大而增强, 并会导致艾里光束的实际焦点向靶面移动。采用预散焦方法可使靶面上的光束始终保持艾里轮廓, 同时可使靶面光强得到显著提高。本文得到了预散焦的焦距公式, 并证实了其有效性。研究发现: 预散焦后, 即使光束功率远远超过了自聚焦临界功率, 非均匀大气的自聚焦效应也不会破坏艾里光束的自加速特性, 有助于地基激光束避开障碍物, 清除空间碎片。在相同的功率下, 艾里光束相比高斯光束在碎片靶面上有更高光强, 并且艾里光束具有更强的抵抗自聚焦效应的能力。因此, 艾里光束比高斯光束更适合地基激光对空间碎片的清除。

**关键词** 大气光学; 艾里光束; 非线性自聚焦效应; 激光大气传输; 传输特性; 光束质量

中图分类号 O437.5

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230810

## 1 引言

众所周知, 艾里光束具有无衍射、自愈以及自加速等特性<sup>[1-4]</sup>。艾里光束以其独特的性质被广泛应用于微粒捕获与操控、成像、等离子体激元和材料加工等领域<sup>[5-11]</sup>。近年来, 国内外研究了非线性效应对艾里光束特性的影响, 得到了一些有趣的结论, 例如: 在非线性光折变介质中, 艾里光束可以改变其轨迹但同时保持其加速度<sup>[12]</sup>; 在非线性克尔聚焦介质中, 即使艾里光束的整体束宽展宽, 传输初期光束主瓣也会发生径向压缩<sup>[13]</sup>。本课题组的研究表明: 当激光功率足够强时, 非线性热晕效应会破坏艾里光束的轮廓<sup>[14]</sup>。

地基激光可以有效清除低轨区域内厘米级的空间碎片<sup>[15]</sup>。由于激光功率已远远超过了大气非线性自聚焦效应的临界功率, 自聚焦效应是导致碎片靶面上光束质量下降的重要物理因素<sup>[16-18]</sup>。相关研究表明, 初始光束散焦和自适应光学可以补偿大气自聚焦带来的不利影响<sup>[16-17]</sup>。近年来, 本课题组研究了高功率激光从地面上行经大气传输至空间轨道的相关物理问题, 得到了如下结论: 在群速度色散与自聚焦的共同作用下, 空间碎片靶面上会出现脉冲分裂和旁瓣<sup>[19]</sup>; 由于非均匀大气自聚焦相位调制, 在靶面上可以实现有利于清除碎片的均匀辐照<sup>[20]</sup>; 由于非线性自聚焦效应, 高功率激光地对空上行经大气传输时存在最佳发射功率。

本课题组推导出了最佳发射功率的解析表达式<sup>[21]</sup>, 并推导出了部分相干脉冲光准稳态和稳态修正焦距的解析表达式及其适用条件<sup>[22]</sup>。

艾里光束的自加速特性可使其绕过障碍物传输, 这有利于清除空间碎片。但已有研究表明: 在均匀非线性自聚焦介质中, 当激光功率足够强时, 自聚焦效应会破坏艾里光束的自加速特性<sup>[23]</sup>。那么, 非均匀大气的自聚焦效应是否会破坏艾里光束的自加速特性? 艾里光束是否比高斯光束更适合用于地基激光空间碎片的清除? 如何提高艾里光束在空间碎片上的光束质量? 针对以上问题, 本文研究了大气非线性自聚焦效应对聚焦艾里光束上行大气传输特性和光束质量的影响, 并得到了有意义的结果。

## 2 理论模型

设聚焦艾里光束在入射面处( $z=0$ )的光场<sup>[1, 24]</sup>为

$$u(x, y, z=0) = u_0 f_{Ai} \left( \frac{x}{w_0} \right) \exp \left( a \frac{x}{w_0} \right) \cdot f_{Ai} \left( \frac{y}{w_0} \right) \exp \left( a \frac{y}{w_0} \right) \exp \left[ -\frac{ik_0(x^2 + y^2)}{2F} \right], \quad (1)$$

式中:  $w_0$  为横向尺度;  $a$  为指数截断因子, 其取值范围通常为  $0 < a \ll 1$ <sup>[1]</sup>; 波数  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为波长;  $F$  为  $z=0$  平面处透镜的焦距;  $f_{Ai}(\cdot)$  为理想艾里函数<sup>[25]</sup>, 其表达

收稿日期: 2023-05-08; 修回日期: 2023-08-06; 录用日期: 2023-08-11; 网络首发日期: 2023-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(62375191, 61775152)

通信作者: \*jxl100@163.com; \*\*lixiaoqing912@sicnu.edu.cn

式为

$$f_{\text{Ai}}(g) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[i\left(\frac{\omega^3}{3} + \omega g\right)\right] d\omega, \quad (2)$$

其中  $g$  为艾里函数的变量,  $\omega$  为积分变量; 系数  $u_0$ <sup>[23]</sup> 可以表示为

$$u_0 = \sqrt{\frac{8\pi a P}{\omega_0^2 \exp(4a^3/3)}}, \quad (3)$$

其中  $P$  为激光入射功率。

当艾里光束指数截断因子  $a$  足够大 (例如,  $a > 1$ ) 时, 式(1)可以简化为

$$u(x, y, z=0) \approx u_0 \left[ f_{\text{Ai}}\left(a^2 - \frac{1}{4a}\right) \right]^2 \exp\left(2a^3 - \frac{1}{2}\right) \exp\left[-\frac{(x-x_c)^2}{4a\omega_0^2} - \frac{(y-x_c)^2}{4a\omega_0^2}\right] \exp\left[-\frac{ik_0(x^2+y^2)}{2F}\right], \quad (4)$$

其中  $x_c = \left(a^2 - \frac{1}{4a}\right)\omega_0$ 。式(4)表明: 当  $a$  足够大时, 聚焦艾里光束退化为聚焦离轴高斯光束。

设高能激光从地面垂直上行经大气传输至空间轨道, 激光在大气中传输的衍射效应和非线性自聚焦效应可用非线性薛定谔方程<sup>[16]</sup>描述, 即

$$2ik_0 \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial z} = -\nabla_{\perp}^2 u(x, y, z) - 2k_0^2 \frac{n_2}{n_0} |u(x, y, z)|^2 u(x, y, z), \quad (5)$$

式中: 等号右边第一项和第二项分别表示衍射效应和自聚焦效应;  $\nabla_{\perp}^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$  为拉普拉斯算符;  $n_0$  和  $n_2$  分别为大气线性折射率和非线性折射率。

一般情况下, 式(5)不能够通过解析求解。本文采用多层相位屏法和离散快速傅里叶变换法对式(5)进行数值模拟求解。将传输距离分为若干段 (段长为  $\Delta z$ ), 每一段的数值求解过程如下: 设  $u(x, y, z_j)$  为式(5)在  $z_j$  平面处的解, 则式(5)在  $z_{j+1} = z_j + \Delta z$  平面处的解<sup>[26]</sup>可以表示为

$$u(x, y, z_{j+1}) = \exp\left(-\frac{i}{4k_0} \Delta z \nabla_{\perp}^2\right) \cdot \exp(-is) \exp\left(-\frac{i}{4k_0} \Delta z \nabla_{\perp}^2\right) u(x, y, z_j), \quad (6)$$

式中:  $s$  是大气传输距离  $\Delta z$  内由非线性自聚焦引起的相位调制。由式(6)可知光场在非线性介质中传输  $\Delta z$  距离可以分为三步: 1) 光场在自由空间中传输  $\Delta z/2$  距离; 2)  $\Delta z$  传输距离内非线性自聚焦效应产生的附加相位加载在位于该段中央的相位屏上; 3) 光场在自由空间传输  $\Delta z/2$  距离。这样, 可采用多层相位屏的方法研究艾里光束在非线性大气中的传输问题。由于聚焦艾里光束在靶面上的尺寸远小于初始光斑尺寸, 为了精确模拟光束的横向分布, 笔者采用非自适应坐标变换编制了数值模拟仿真程序<sup>[27]</sup>。

忽略衍射, 式(5)可以简化为

$$i \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial z} = -k_0 \frac{n_2}{n_0} |u(x, y, z)|^2 u(x, y, z), \quad (7)$$

即非线性效应可用式(7)来描述。经过  $\Delta z$  的非线性传输后, 求解式(7)可得到  $z_{j+1} = z_j + \Delta z$  平面上的场表

达式  $u(x, y, z_{j+1})$  为

$$u(x, y, z_{j+1}) = u(x, y, z_j) \exp\left[\frac{ik_0 n_2 I(x, y, z_j)}{n_0} \Delta z\right], \quad (8)$$

其中  $I(x, y, z_j) = u(x, y, z_j) u^*(x, y, z_j)$ , 星号 \* 表示共轭。  $I(x, y, z_j)$  在传输距离  $\Delta z$  内的变化非常小, 可将  $I(x, y, z_j)$  近似看作一个常数, 式(8)是在该近似下式(7)的解。由式(8)可知: 激光在大气中传输  $\Delta z$  距离后, 非线性自聚焦引起的相位为  $s(x, y, z_j) = k_0 n_2 I(x, y, z_j) \Delta z / n_0$ 。

大气非线性折射率是高度  $z$  的函数, 即  $n_2(z) = n_{20} \exp(-z/h)$ <sup>[16]</sup>, 其中  $h=6$  km, 地面非线性折射率系数  $n_{20} = 4.2 \times 10^{-19}$  cm<sup>2</sup>/W。  $n_2$  随着  $z$  的增大而减小, 计算可知: 当  $z=z_0=30$  km 时,  $n_2/n_{20} \approx 0$ 。因此, 本文的聚焦艾里光束垂直上行大气传输可以分为两段 (传输模型): 非均匀大气传输 ( $z=0 \sim 30$  km), 考虑自聚焦效应和衍射效应; 真空传输 ( $z=30$  km  $\sim L$ ,  $L$  为轨道高度), 仅考虑衍射效应。本文数值计算采用的参数如下:  $\lambda=1.06$   $\mu\text{m}$ ,  $\omega_0 = \sqrt{2}$  m, 轨道高度  $L=1000$  km (空间碎片主要集中在 1000 km 附近的近地轨道<sup>[28]</sup>), 且  $F=L$ 。此外, 采用高斯光束大气自聚焦临界功率  $P_{\text{cr}} = \lambda^2 / (2\pi n_0 n_{20}) = 4.3$  GW, 其为功率  $P$  的归一化因子。

目前产生艾里光束的方法有多种, 其中基于傅里叶透镜像差的方法具有系统简单易实现以及可产生较高功率、高质量可调艾里光束的优势<sup>[29-30]</sup>。随着激光技术的发展, 将会有更好的产生高功率艾里光束的方法出现。另外, 为了减小激光远程大气传输造成的光束扩展以及大气非线性效应的影响, 须进行激光扩束, 进而实现大口径、高功率激光束输出。

### 3 B 积分

$B$  积分是定量描述自聚焦效应对光束质量影响的重要特征参数。激光束在非均匀大气中传输的  $B$  积分<sup>[31]</sup>可表示为

$$B = k_0 \int_0^{z_0} I_{\text{max}}(z) n_2(z) dz, \quad (9)$$

式中:  $z_0=30$  km;  $I_{\text{max}}(z)$  为  $z$  处光强的最大值。  $B$  积分

值越大,表明自聚焦效应对光束质量的影响越大。

众所周知,激光功率越大,自聚焦效应越强。为了保证光束质量,避免光束成丝, $B$ 积分值通常不能超过几个单位<sup>[32]</sup>。聚焦艾里光束上行大气传输的 $B$ 积分随其指数截断因子 $a$ 的变化曲线如图 1 所示。该图表明: $B$ 积分值随 $a$ 值增大而增大,即自聚焦效应增强。该现象的物理原因是:艾里光束主瓣光强随 $a$ 值增大而增大,故大气自聚焦效应增强。

#### 4 焦移以及预散焦

光束衍射效应和大气自聚焦效应均会导致光束焦移<sup>[16,33]</sup>。为了比较聚焦艾里光束与聚焦高斯光束在上行大气传输过程中焦移的不同,分别绘制了两者最大光强 $I_{\max}$ 随传输距离 $z$ 的变化曲线,如图 2(a)和图 2(b)所示,其中点划线和实线分别表示自由空间(真空)和大气中的情况。定义 $I_{\max}$ 最大值的位置 $F'$ 为实际焦点位置,且焦移 $\delta = F - F'$ 。相较于自由空间传输,大气自聚焦效应导致聚焦艾里光束的实际焦点更靠近靶面,即 $\delta$ 减小[如图 2(a)所示],而聚焦高斯光束的实际

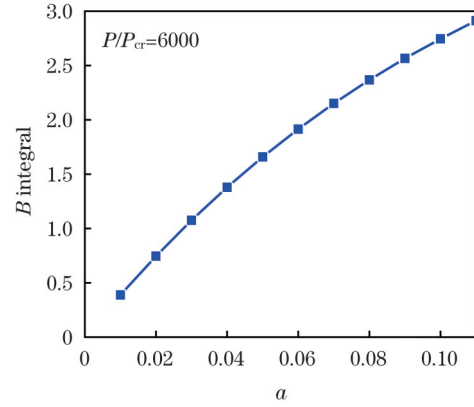


图 1  $B$ 积分随艾里光束指数截断因子 $a$ 的变化  
Fig. 1  $B$  integral versus the exponential truncation factor  $a$

焦点更远离靶面,即 $\delta$ 增大[如图 2(b)所示]。其物理原因是:艾里光束在远场受衍射效应的影响大,实际焦点远离靶面,但自聚焦效应在一定程度上减弱了其衍射效应,导致实际焦点向靶面移动。此外,聚焦艾里光束在远场靶面上的光强骤降,其原因是光束在远场靶面上不能够保持艾里轮廓。

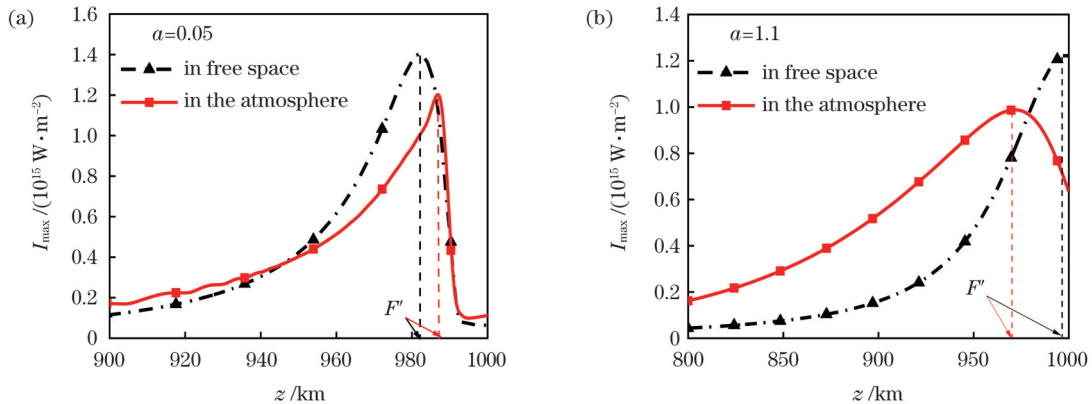


图 2 最大光强 $I_{\max}$ 随传输距离 $z$ 的变化, $P/P_{cr}=6500$ 。(a)艾里光束;(b)高斯光束  
Fig. 2 Maximum intensity  $I_{\max}$  versus the propagation distance  $z$ ,  $P/P_{cr}=6500$ . (a) An Airy beam; (b) a Gaussian beam

不同指数截断因子 $a$ 下,聚焦艾里光束最大光强 $I_{\max}$ 随传输距离 $z$ 的变化曲线示于图 3 中,其中点划线和实线分别表示自由空间和大气中的情况。图 3 表明:不论是在自由空间中还是在大气中,实际焦点位置都随着 $a$ 值增大而远离靶面(即焦移增大),但大气自聚焦效应使得 $a$ 对焦移的影响减弱。

由图 2 和图 3 可知聚焦艾里光束的实际焦点不在靶面上,而且靶面光强骤降,这不利于地基激光对空间碎片的清除。本文采用预散焦的方法(预散焦的焦距为 $F_{pre} = F + \delta$ ),将聚焦艾里光束的实际焦点移至靶面,以提高靶面的光束质量。笔者通过大量的数值计算发现焦移 $\delta$ 随着指数截断因子 $a$ 的增大而显著增大,但焦移 $\delta$ 随光束功率 $P$ 的改变发生的变化非常小。笔者根据大量的数值模拟结果得到了预散焦的焦距 $F_{pre}$ 随 $a$ 变化的拟合公式,即

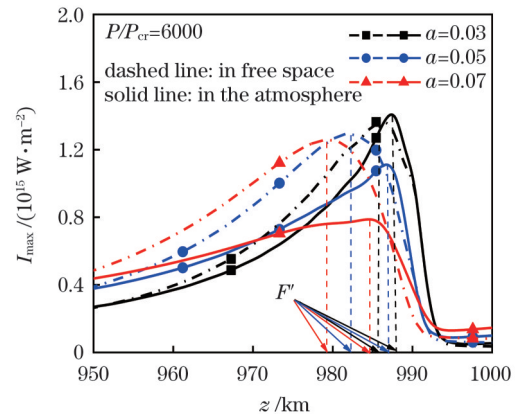


图 3 不同指数截断因子 $a$ 下,艾里光束最大光强 $I_{\max}$ 随传输距离 $z$ 的变化  
Fig. 3 For different values of exponential truncation factor  $a$ , the maximum intensity  $I_{\max}$  versus the propagation distance  $z$



$$F_{\text{pre}} = 1143 - \frac{133}{1 + (a/0.32)^{9/5}}, \quad (10)$$

式中:  $F_{\text{pre}}$  的单位为 km。  $F_{\text{pre}}$  随艾里光束指数截断因子  $a$  的变化如图 4 所示, 其中红线和黑点分别表示式

(10) 计算结果和数值模拟结果。图 4 表明: 在不同的光束功率下, 式(10)计算结果与数值模拟结果都比较吻合。这说明式(10)所示的根据数值模拟得到的预散焦焦距公式是有效的。

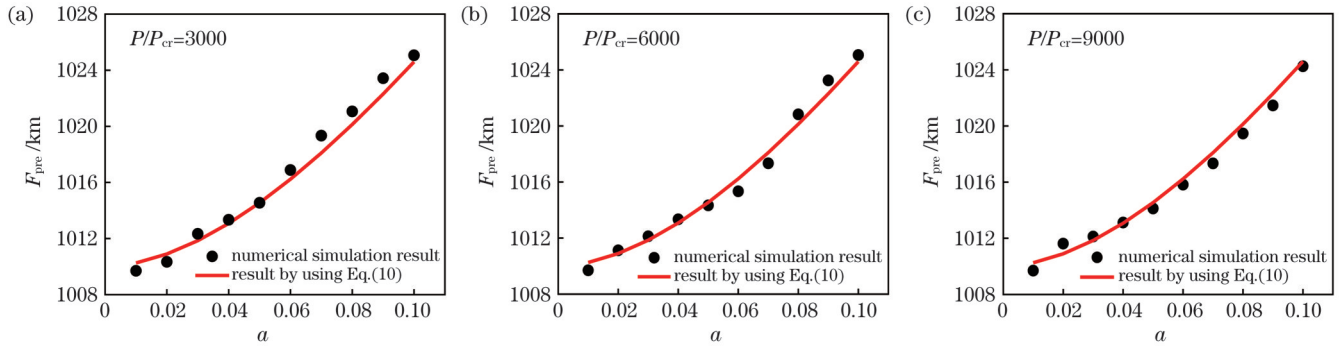


图 4 不同功率下, 预散焦的焦距  $F_{\text{pre}}$  随指数截断因子  $a$  的变化

Fig. 4 For different values of beam power,  $F_{\text{pre}}$  versus  $a$

无预散焦和有预散焦情况下, 艾里光束在靶面上的光强分布分别示于图 5(a) 和图 5(b)。由于大气的自聚焦效应和光束衍射效应, 无预散焦情况下光强在靶面上不能够保持艾里轮廓, 而且光强也不同于在自由空间中传输至远场的类高斯分布, 如图 5(a) 所示。

但是, 采用式(10)进行预散焦后, 光强在靶面上又恢复了艾里轮廓, 如图 5(b) 所示。并且, 相较于无预散焦情况, 预散焦后靶面上的光强显著提高, 这是因为预散焦补偿了大气自聚焦效应和衍射效应对艾里光束带来的不利影响。

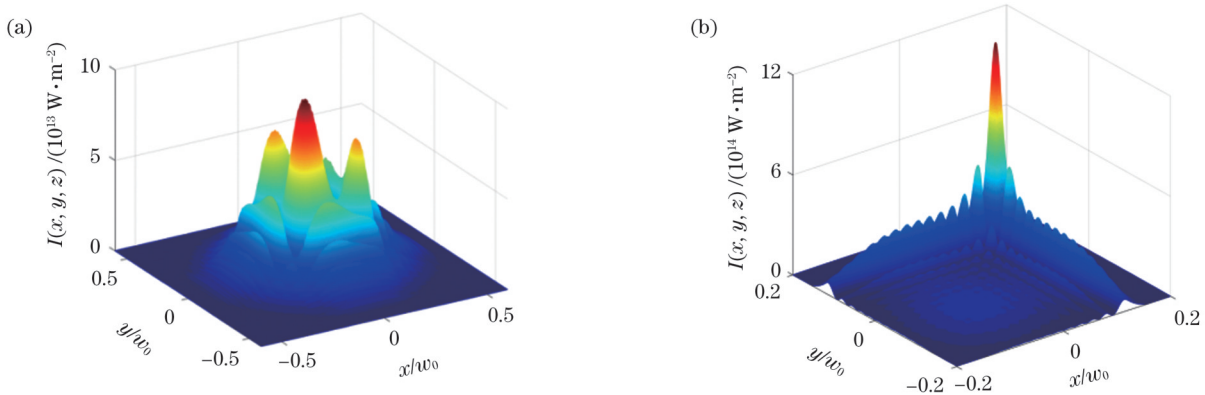


图 5 靶面光强分布 ( $a=0.05, P/P_{\text{cr}}=6000$ )。 (a) 无预散焦; (b) 有预散焦

Fig. 5 Intensity distributions at the target ( $a=0.05, P/P_{\text{cr}}=6000$ ). (a) Without preliminary defocusing; (b) with preliminary defocusing

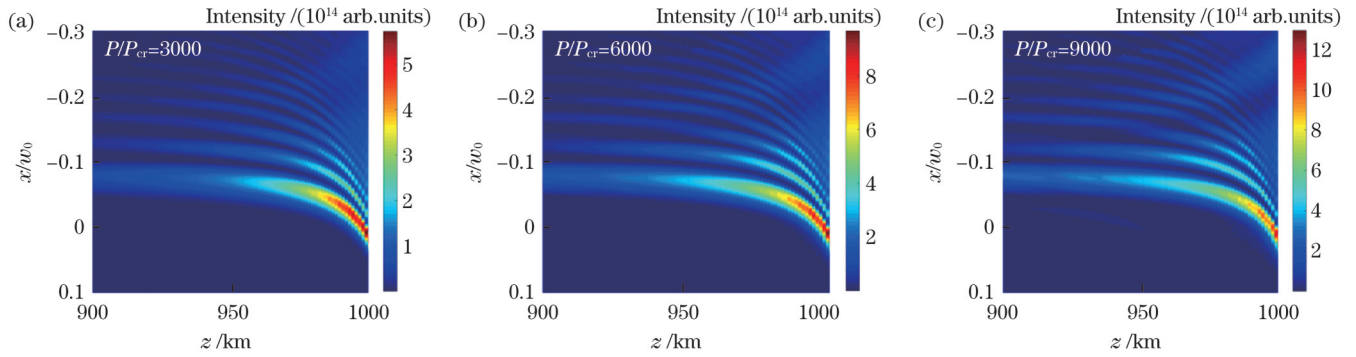
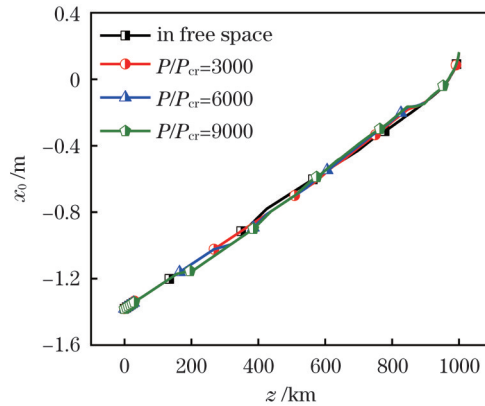
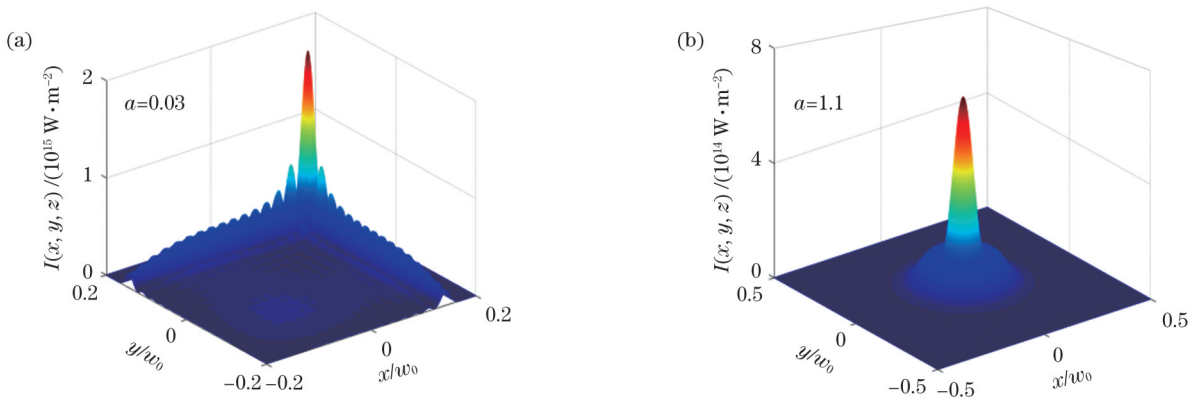
## 5 自加速特性

众所周知, 艾里光束在线性介质中传输时具有自加速特性<sup>[1]</sup>, 但其在均匀自聚焦介质中传输时, 非线性自聚焦效应会破坏其自加速特性<sup>[23]</sup>。然而, 本文研究发现: 艾里光束从地面上行经大气传输至空间轨道(在非均匀自聚焦介质中传输)时会出现与均匀自聚焦介质中不同的现象, 即自聚焦效应不会破坏其自加速特性。根据式(10)预散焦后, 不同功率  $P$  下聚焦艾里光束上行经大气传输时,  $x$  轴方向的光强分布随传输距离  $z$  的变化示于图 6。图 6 表明, 即使光束功率远远超过了自聚焦临界功率(如  $P/P_{\text{cr}}=9000$ ), 艾里光束仍可保持其自加速特性。并且, 比较图 6(a)、图 6(b)、图 6(c) 后可知: 不同功率  $P$  下, 艾里光束的自加速特性

没有明显改变, 即非均匀大气自聚焦效应不会明显改变艾里光束的自加速特性。为了证实该特性, 笔者绘制了最大光强横向位置  $x_0$  随传输距离  $z$  的变化曲线, 如图 7 所示。可见: 无论是在真空中还是在大气中, 艾里光束的最大光强位置均从  $x$  负半轴一直向正半轴移动, 且光束沿着相同的加速轨迹传输。艾里光束在大气中上行沿曲线路径传输, 这有助于激光束避开障碍物, 清除空间碎片。

## 6 靶面光束质量

散焦后, 聚焦艾里光束与聚焦高斯光束上行经大气传输至靶面的光强分布分别示于图 8(a) 和图 8(b)。可以看出, 即使当光束功率非常高(如  $P=9000P_{\text{cr}}$ ) 时, 艾里光束仍然可以保持艾里轮廓[如图 8(a) 所示], 而

图 6 不同功率下,  $x$  轴方向的光强分布随传输距离  $z$  的变化 ( $a=0.06$ )Fig. 6 For different values of beam power, intensity profile along  $x$  axis versus the propagation distance  $z$  ( $a=0.06$ )图 7 最大光强横向位置  $x_0$  随传输距离  $z$  的变化 ( $a=0.06$ )Fig. 7 Transverse position  $x_0$  of the intensity maximum versus the propagation distance  $z$  ( $a=0.06$ )图 8 靶面光强分布 ( $P/P_{cr}=9000$ )。(a) 艾里光束; (b) 高斯光束Fig. 8 Intensity distributions at the target ( $P/P_{cr}=9000$ ). (a) An Airy beam; (b) a Gaussian beam

高斯光束已不能保持高斯分布[如图 8(b)所示]。因此,在非均匀大气中传输时,艾里光束比高斯光束更能抵抗自聚焦效应。特别地,在相同的功率下,艾里光束相比高斯光束在碎片靶面上有更高的光强。因此,艾里光束比高斯光束更适合用于空间碎片的清除。

## 7 结 论

本文研究了大气非线性自聚焦效应对聚焦艾里光束上行大气传输特性和光束质量的影响。研究结果表明,随着指数截断因子增大,艾里光束的  $B$  积分值增大,即自聚焦效应增强。大气自聚焦效应导致艾里光

束的实际焦点位置靠近靶面(即焦移减小),这一特性与高斯光束截然不同。并且,采用预散焦方法可使靶面上的光束仍保持艾里轮廓,靶面光强也得到显著提高。特别地,本文得到了预散焦的焦距公式,并证实了其有效性。研究发现,预散焦后,即使光束功率远远超过了自聚焦临界功率,非均匀大气的自聚焦效应也不会破坏艾里光束的自加速特性,这与艾里光束在均匀自聚焦介质中的传输特性截然不同。艾里光束在大气中上行传输时的路径为曲线,此特性有助于激光束避开障碍物,清除空间碎片。在相同的功率下,艾里光束相比高斯光束在碎片靶面上具有更高的光强和更强的

抵抗自聚焦效应的能力。因此,艾里光束比高斯光束更适合用于地基激光空间碎片清除。本文所得结果具有理论和实际应用意义。

### 参 考 文 献

- [1] Siviloglou G A, Christodoulides D N. Accelerating finite energy Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(8): 979-981.
- [2] Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, et al. Observation of accelerating Airy beams[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(21): 213901.
- [3] Broky J, Siviloglou G A, Dogariu A, et al. Self-healing properties of optical Airy beams[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 12880-12891.
- [4] 李怡, 楚兴春, 唐翰玲, 等. 有限能量艾里光束的传输演化特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(13): 1326001.  
Li Y, Chu X C, Tang H L, et al. Propagation and evolution characteristics of finite energy Airy beams[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(13): 1326001.
- [5] 程化, 臧维平, 田建国. 艾里光束对微小颗粒的捕获和输运研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(s1): s100405.  
Cheng H, Zang W P, Tian J G. Study on optical trapping and propulsion of small particles by Airy beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(s1): s100405.
- [6] Zhang Z, Zhang P, Mills M, et al. Trapping aerosols with optical bottle arrays generated through a superposition of multiple Airy beams[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(3): 033502.
- [7] Jia S, Vaughan J C, Zhuang X W. Isotropic three-dimensional super-resolution imaging with a self-bending point spread function[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(4): 302-306.
- [8] Zhang P, Wang S, Liu Y M, et al. Plasmonic Airy beams with dynamically controlled trajectories[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3191-3193.
- [9] Götte N, Winkler T, Meinel T, et al. Temporal Airy pulses for controlled high aspect ratio nanomachining of dielectrics[J]. *Optica*, 2016, 3(4): 389-395.
- [10] 周泽宇, 元秀华, 周峰. 环形艾里振幅调控及其对湍流传播特性的优化[J]. *光学学报*, 2022, 42(20): 2026002.  
Zhou Z Y, Yuan X H, Zhou F. Annular Airy amplitude regulation and its optimization for turbulence propagation characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(20): 2026002.
- [11] 晏庆玉, 王冠学, 李仔艳, 等. 几何相位调制参数对艾里光束的影响[J]. *光学学报*, 2022, 42(14): 1405006.  
Yan Q Y, Wang G X, Li Z Y, et al. Influence of geometric phase modulation parameters on Airy beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(14): 1405006.
- [12] Hu Y, Sun Z, Bongiovanni D, et al. Reshaping the trajectory and spectrum of nonlinear Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(15): 3201-3203.
- [13] Chen R P, Yin C F, Chu X X, et al. Effect of Kerr nonlinearity on an Airy beam[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(4): 043832.
- [14] Ji X L, Eyyuboğlu H T, Ji G M, et al. Propagation of an Airy beam through the atmosphere[J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 2154-2164.
- [15] Campbell J W. Project Orion: orbital debris removal using ground-based sensors and lasers[EB/OL]. [2023-03-05]. <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/N19960054373.xhtml>.
- [16] Rubenchik A M, Fedoruk M P, Turitsyn S K. The effect of self-focusing on laser space-debris cleaning[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(4): e159.
- [17] Vaseva I A, Fedoruk M P, Rubenchik A M, et al. Light self-focusing in the atmosphere: thin window model[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30697.
- [18] Rubenchik A M, Vaseva I A, Fedoruk M P, et al. Laser space debris cleaning: elimination of detrimental self-focusing effects[J]. *Optical Engineering*, 2018, 58(1): 011003.
- [19] Zhang Y Q, Ji X L, Zhang H, et al. Self-focusing and group-velocity dispersion of pulsed laser beams in the inhomogeneous atmosphere[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 14617-14625.
- [20] Deng Y, Ji X L, Yu H, et al. Uniform irradiation generated by beam self-focusing in the inhomogeneous atmosphere[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 14585-14593.
- [21] Hang Z Y, Ji X L, Deng Y, et al. Optimal power of laser beams propagating from the ground through the atmosphere to space orbits[J]. *Optics Communications*, 2021, 498: 127210.
- [22] 李倩, 李桃, 胡婧, 等. 非均匀大气中准稳态自聚焦效应对靶面光束质量的影响[J]. *光学学报*, 2023, 43(12): 1201005.  
Li Q, Li T, Hu J, et al. Influence of quasi-steady-state self-focusing effect in inhomogeneous atmosphere on beam quality at target surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(12): 1201005.
- [23] Wang L, Ji X L, Deng Y, et al. Self-focusing effect on the characteristics of Airy beams[J]. *Optics Communications*, 2019, 441: 190-194.
- [24] Chu X X. Evolution of an Airy beam in turbulence[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2701-2703.
- [25] Wu Y L, Nie J S, Shao L. Complete solutions of finite Airy beams in free space and graded index media with Fourier analysis[J]. *Optik*, 2017, 138: 377-389.
- [26] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*[M]. New York: Academic Press, 1995.
- [27] 张飞舟. 计算聚焦激光束传输的非自适应坐标变换[J]. *量子电子学报*, 2003, 20(6): 656-660.  
Zhang F Z. Non-adaptive transformation to calculate the propagation of the focused laser beams[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2003, 20(6): 656-660.
- [28] Phipps C R, Baker K L, Libby S B, et al. Removing orbital debris with lasers[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49(9): 1283-1300.
- [29] Papazoglou D G, Suntsov S, Abdollahpour D, et al. Tunable intense Airy beams and tailored femtosecond laser filaments[J]. *Physical Review A*, 2010, 81(6): 061807.
- [30] Acebal P, Carretero L, Blaya S, et al. Generation of high-quality tunable one-dimensional airy beams using the aberrations of a single lens[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1273-1280.
- [31] Rubenchik A M, Turitsyn S K, Fedoruk M P. Modulation instability in high power laser amplifiers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1380-1388.
- [32] Chekalin S V, Kandidov V P. From self-focusing light beams to femtosecond laser pulse filamentation[J]. *Physics-Uspekhi*, 2013, 56(2): 123-140.
- [33] Zhang G, Deng Y, Ji X L. Hard-aperture effect on self-focusing of high-power laser beams propagating in the atmosphere[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2021, 38(9): 1270-1275.

# Influence of Nonlinear Self-Focusing on Airy Beams Propagating Upwards in the Atmosphere

Luo Jing, Ji Xiaoling\*, Li Xiaoqing\*\*

*College of Physics and Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, Sichuan, China*

## Abstract

**Objective** Ground-based laser systems can remove centimeter-scale space debris in the low-Earth orbit region. However, as the high-power laser beam propagates through the atmosphere, it encounters significant challenges. When the beam's power exceeds the atmosphere's critical power for the self-focusing effect, the beam quality at the target diminishes due to this nonlinear effect.

Interestingly, Airy beams exhibit self-accelerating characteristics, making them potentially advantageous for bypassing obstacles. However, in homogeneous self-focusing media, an Airy beam can lose its self-accelerating traits if its power is exceedingly high. This leads to pressing inquiries: Does the nonlinear self-focusing effect in an inhomogeneous atmosphere disrupt the self-accelerating nature of Airy beams? Is an Airy beam better suited than a Gaussian beam for ground-based laser space debris removal? How to enhance the target quality of Airy beams? Hence, analyzing the influence of nonlinear self-focusing on the attributes and quality of upward-propagating Airy beams in the atmosphere becomes crucial.

**Methods** Under the paraxial approximation, the beam characteristics of diffraction and self-focusing nonlinearity were described via a nonlinear Schrödinger equation. However, solving the nonlinear Schrödinger equation analytically for an Airy beam propagating in the atmosphere is challenging. In this study, the nonlinear Schrödinger equation was solved numerically using the multiphase screen method. As the altitude increased, the nonlinear refractive index decreased, and the nonlinear self-focusing effect became negligible at sufficiently high altitudes. Consequently, an Airy beam that propagated upward in the atmosphere experienced two stages: inhomogeneous atmospheric propagation (comprising both diffraction and self-focusing effects) and free space propagation (with only the diffraction effect).

**Results and Discussions** As the exponential truncation factor of the Airy beams increases, the value of the  $B$  integral also increases (Fig. 1), indicating a strengthening of the nonlinear self-focusing effect. The real focus of Airy beams shifts to the target due to self-focusing in an inhomogeneous atmosphere, a behavior distinct from that of Gaussian beams (Fig. 2). By employing the preliminary defocusing method, an Airy beam maintains its Airy profile at the target even when the beam power significantly exceeds the critical power of the self-focusing effect in the atmosphere, and the intensity at the target notably increases (Fig. 5). Specifically, a formula for the focal length of the preliminary defocusing of the Airy beams is obtained, and this is also confirmed (Fig. 4). With the preliminary defocusing method, the self-accelerating characteristics of the Airy beams remain unaffected by the nonlinear self-focusing effect in an inhomogeneous atmosphere, even when the beam power significantly surpasses the critical power (Figs. 6 and 7). This differs from the behavior of Airy beams in a homogeneous atmosphere. Given the same beam power, the intensity of the Airy beam at the target surpasses that of the Gaussian beam (Fig. 8). Additionally, the Airy beam's resistance to the nonlinear self-focusing effect in an inhomogeneous atmosphere exceeds that of the Gaussian beam (Fig. 8).

**Conclusions** In this study, the influence of nonlinear self-focusing on the characteristics and quality of Airy beams, as they are propagated from the ground through the atmosphere to space orbit, is numerically investigated. The strengthening of the self-focusing effect with the increasing exponential truncation factor of the Airy beams is observed. It is found that the Airy profile can be maintained at the target, even when the beam power significantly exceeds the critical power of the self-focusing effect, when the preliminary defocusing method is used, leading to a significant increase in target intensity. Furthermore, a formula for the focal length of the preliminary defocusing of Airy beams is derived. The self-accelerating characteristic of Airy beams is shown to be preserved with the preliminary defocusing method, proving beneficial for avoiding obstacles in the path. Under the same beam power, the target intensity of the Airy beam is found to be significantly higher than that of the Gaussian beam, suggesting that Airy beams are deemed more suitable than Gaussian beams for ground-based laser space debris removal.

**Key words** atmospheric optics; Airy beam; nonlinear self-focusing effect; laser beam propagation in the atmosphere; propagation characteristics; beam quality