艾里光束研究进展及其用于 FSO 系统的可行性分析

楚兴春, 赵尚弘, 程振, 李勇军*, 李瑞欣, 方英武

空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077

* 联系人, E-mail: liyongj@aliyun.com

2015-10-20 收稿, 2015-12-26 修回, 2015-12-27 接受, 2016-02-01 网络版发表

摘要 艾里光束作为无衍射光的一种, 以其无衍射、横向自加速和自愈的独有特性而受到普遍关注, 在光学微粒操控、光子弹、电子加速以及艾里激光器等领域有着广阔的应用前景. 本文从艾里光的产生方法、加速轨迹控制、阵列合成自聚焦以及大气传输特性4个方面简单综述了艾里光束的研究进展, 并从通信的角度比较了艾里光与高斯光束的传输特性, 分析了其用作FSO系统信息载波的可行性, 指出利用径向对称分布艾里光阵列合成自聚焦光束, 不仅能提高FSO系统接收面上的光强, 而且能有效抑制光束扩展、光强闪烁和光束漂移等大气效应, 是实现远距离、高速率FSO系统的一条可行途径.

关键词 艾里光束, 产生方法, 轨迹控制, 自聚焦, 自由空间光通信, 大气效应

自从1987年一种称作贝塞尔光束的无衍射光被实验产生以来, 无衍射光在理论研究和实践应用中都得到了众多学者的广泛关注. 无衍射光是自由空间标量波动方程的一组特殊解, 它的横向强度分布不随传播距离的增加而变化, 且有着传播距离远, 中心光斑光强集中, 光斑半径小的优点^[1]. 2007年, Siviloglou等人^[2,3]首次在实验中观察到了一种新型无衍射光——艾里光, 并验证了艾里光能保持长距离无衍射传输且有横向加速的现象. 艾里光具有非常诱人的3大特性^[4-6]: (1) 无衍射特性. 理想艾里光包含无限能量, 从理论上讲在传输过程中是无衍射的. 实验产生的有限能量艾里光仍具有无衍射特性, 其主瓣尺寸在自由空间传输过程中基本不变. (2) 自愈特性. 当艾里光在传输过程中遇到障碍物遮挡丢失部分信息后, 通过其内部能量流动可实现自愈, 具有非凡的抗扰动能力. (3) 横向加速特性. 艾里光在自由空间中传输时其主瓣不是沿直线传输, 而是沿抛物线轨迹传播. 艾里光的独特性质使其在等离子通道^[7]、微粒操控^[8,9]、光子弹^[10]、大气通信^[11,12]以及其他领域

具有广阔的应用前景.

1 艾里光束的研究进展

Berry和Balaz通过理论证明, 薛定谔方程描述的自由粒子可表示为无衍射Airy波包的解^[1], 即

$$U(s, \xi) = Ai \left[s - \left(\frac{\xi}{2} \right)^2 \right] \exp \left(i s \frac{\xi}{2} - i \frac{\xi^3}{12} \right), \quad (1)$$

式中 U 是电场包络, $s=x/x_0$ 是量纲的横坐标; $\xi=z/kx_0^2$ 是归一化的传播距离; x_0 是横向尺度因子, $k=2\pi/\lambda$ 是光波的波数, λ 是真空中波长. 在原点处 $U(s,0)=Ai(s)$, $Ai(s)$ 为Airy函数.

(1)式表明艾里光束在传输过程中其横向强度分布始终保持不变, 具有无衍射特性并且沿着抛物线轨迹传播. 但是, 理想的艾里光束由于旁瓣的缓慢衰减而携带无限能量, 是物理不可实现的. 2007年Siviloglou等人^[2,3]用指数衰减函数对理想艾里函数进行截断处理, 得到有限能量的艾里光

$$U(s, \xi=0) = Ai(s) \exp(as), \quad (2)$$

引用格式: 楚兴春, 赵尚弘, 程振, 等. 艾里光束研究进展及其用于 FSO 系统的可行性分析. 科学通报, 2016, 61: 1963–1974

Chu X C, Zhao S H, Cheng Z, et al. Research progress of Airy beam and feasibility analysis for its application in FSO system (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1963–1974, doi: 10.1360/N972015-00265

式中, $0 < a < 1$ 是指数衰减因子, 它控制了无限能量 Airy 光的旁瓣数量并使 Airy 光物理可实现. 有限能量艾里光的傅里叶谱 $U_0(k)$ 在 k 空间归一化后为

$$U_0(k) = \exp(-ak^2) \exp\left(i\frac{1}{3}k^3 - ia^2k + \frac{1}{3}a^3\right), \quad (3)$$

(3) 式表明截断后艾里光的傅里叶谱是高斯函数与一个调制立方相位的乘积. 一维有限能量艾里光的场分布为

$$U(\xi, s) = \text{Ai}\left[s - \left(\frac{\xi}{2}\right)^2 + ia\xi\right] \times \exp\left[as - \left(\frac{a\xi^2}{2}\right) + i\left(\frac{s\xi}{2}\right) - i\left(\frac{\xi^3}{12}\right) + i\left(\frac{a^2\xi}{2}\right)\right], \quad (4)$$

(4) 式表明, 经过截断的艾里光的传输轨迹没有变化, 仍然具有自加速性质, 但光强随传输距离的增大却逐渐衰减, 具有有限的能量, 是可以实现的, 而且在一定的传输距离内仍具有无衍射的特性.

目前国内外学者对艾里光的研究主要集中于其产生方法、加速轨迹控制、阵列合成自聚焦和大气传输特性等方面. 此外, 对艾里光的应用前景文献[13]已有归纳, 本文不再赘述.

1.1 艾里光的产生方法

(i) 基于液晶空间光调制器. 2007年, Siviloglou 等人^[2,3]从理论上推导出艾里光的傅里叶谱是包含有立方相位因子的高斯型分布, 采用计算机生成立方相位图并将其加载至空间光调制器, 激光器产生的高斯光束经准直后入射空间光调制器, 被立方相位调制的高斯光束经傅里叶透镜后在后焦面得到艾里光, 如图1所示.

图1 (网络版彩色) 基于空间光调制器产生艾里光的原理图

Figure 1 (Color online) Generation of Airy beam based on spatial light modulator

(ii) 基于衍射光学元件设计的相位板. 为获得较大功率的艾里光, 可以采用基于衍射元件的连续相位板来代替液晶空间光调制器. 2009年, Ellenbogen 等人^[14,15]针对不对称的非线性光子晶体提出利用三波混频法产生 Airy 加速光束的方法, Airy 加速光束获得新的波长, 同时具有更高的能量. 另外, Dai 等人^[16,17]提出将二元相位转移到聚合分散液晶样本中产生艾里光束的方法. 2011年, Cao 等人^[18]用激光直写系统在 AR-N4340 负性光刻胶上制作了一个立方相位分布的连续相位板, 实验测得这种连续相位板的衍射效率可以达到 98.33%, 远高于液晶空间光调制器, 原理如图2所示.

(iii) 基于艾里表面等离子体元. 表面等离子体元是沿着金属和介质面传播的表面电磁波. 2010年 Salandrino 等人^[19]通过理论研究发现金属表面可以产生艾里等离子体元, 并给出了理论预测结果和实验产生方法. 2011年, Minovich 等人^[20]在玻璃基底上沉积了金薄膜耦合光栅产生了艾里等离子体元, 如图3所示. 光栅的相位值为二元 0 和 π , 相位跳跃点的间隔对应着一维艾里波包中各瓣的宽度.

(iv) 艾里激光器. 2011年, Longhi^[21]在理论上推导出微芯片激光的平面腔有小角度倾斜时, 在合适的高斯泵浦激光作用下能发射出艾里光束. 同年, Porat 等人^[22]用非周期的衍射光栅取代激光腔的输出镜, 制作出能够产生 Airy 光束的艾里光激光器, 如图4所示. 衍射光栅对入射光做立方相位调制, 把大部分的入射光反射回腔内, 同时允许多个衍射级的激光输出到腔外.

图2 (网络版彩色) 基于连续相位板产生艾里光的原理图

Figure 2 (Color online) The schematic diagram of generation of Airy beam using continuous phase plate

图3 (网络版彩色)产生艾里等离子激元的原理图。(a) 艾里函数振幅绝对值; (b) 光栅的相位图; (c) 光栅的结构; (d) 实验平台

Figure 3 (Color online) The schematic diagram of Airy plasmons' generation. (a) Absolute value of the Airy function; (b) phase of the optical grating; (c) grating geometry for the generation of Airy plasmons; (d) stage of the experiment

图4 (网络版彩色)艾里激光器原理图

Figure 4 (Color online) Airy beam laser

上述产生艾里光的方法中, 基于液晶空间光调制器的方法易于实现艾里光的动态控制, 但输出艾里光的功率较低, 且长焦距傅里叶透镜的使用使得实验装置体积较大。其他几种基于衍射光学元件的方法可获得较大的输出功率, 但不便于对艾里光进行动态控制。不论是哪一种方法, 设计或制备立方相位图都是其关键。较常采用的方法是对艾里光做傅里叶变换, 提取其傅里叶变换函数的相位因子来获

得立方相位图, 但这种方法在实验中需要用到傅里叶透镜。2009年, Cottrell等人^[23]提出从艾里光的加速轨迹函数反推其在入射面上纯相位函数的方法, 避免了傅里叶变换透镜的使用, 提高了光能利用率。2013年, 国承山等人^[24]提出通过振荡函数的局域空间频率推算相位函数的方法, 可用于产生任意加速轨迹的艾里光, 使得艾里光的加速轨迹易于控制。

1.2 艾里光的加速轨迹控制

艾里光的加速轨迹与其产生方法紧密联系, 主要是通过改变光学系统的参数或立方相位板的相位图来实现。

(i) 改变光学系统参数。2008年, Siviloglou等人^[25]在艾里光的初始场分布函数中加上与发射角相关的因子, 讨论了不同发射角情况下艾里光束的抛物线轨迹。实验中通过旋转傅里叶透镜来改变艾里光的发射角, 结果表明不同发射角的艾里光可使主瓣能量偏转至不同的位置却不改变抛物线轨迹的弯曲程度, 如图5所示。2010年, Hu等人^[26]通过平移立方相位膜片和高斯光束的相对位置实现了艾里光加速轨迹的控制, 其原理和实验结果如图6所示。实验结果显示, 通过平移膜片的质心和入射高斯光束的中心, 抛物线的水平距离和高度都可以实现艾里光束峰值光强落点的控制。此外, 如果改变相位模板垂直-水平的长度比率, 艾里光束的弯曲程度也发生改变, 这种控制艾里光束传输轨迹的方法, 在产生等离子艾里光束时得到验证^[27]。

(ii) 改变梯度折射率。2011年, Ye等人^[28]分析了不同折射率梯度中传输的艾里光束的动态特性, 实验中通过选择不同的折射率梯度, 实现了任意形式的艾里光束传输轨迹, 实验原理和结果如图7所示。图7(c)~(f)是不同梯度折射率时艾里光的传输轨迹。

图5 (网络版彩色)不同发射角时艾里光束的加速轨迹, 圆环表示障碍物

Figure 5 (Color online) Ballistic trajectory of Airy beam when launching angles are different. Circle represents obstacle

图6 (网络版彩色)平移高斯光束和相位膜片控制艾里光束的加速轨迹的原理图(a)与模拟结果(b)~(f)

Figure 6 (Color online) The schematics (a) and simulation results (b)–(f) of propagation trajectory control of Airy beam by translating Gaussian and phase mask

图7 (网络版彩色)改变晶体梯度折射率控制艾里光束加速轨迹的原理图(a)~(b)与实验结果(c)~(f)

Figure 7 (Color online) The schematics (a)–(b) and experimental results (c)–(f) of acceleration control of Airy beam by changing refractive-index gradient crystal

同年, Liu等人^[29]研究发现金属-电介质-金属构成的楔形缝隙的梯度折射率会随楔形夹角的变化而变化, 从而导致等离子激元艾里光加速轨迹的变化, 结果如图8所示.

(iii) 改变非线性光子晶体的温度. 2013年, Liu等人^[30]研究发现在非线性光子晶体中产生的二次谐波具有立方相位, 通过改变晶体温度可改变二次谐波的相位函数, 从而改变艾里光的加速方向和波长,

图8 (网络版彩色)改变楔形狭缝夹角控制艾里光束加速轨迹的原理图(a)~(b)与模拟结果(c)~(h)

Figure 8 (Color online) The schematics (a)–(b) and simulation results (c)–(h) of acceleration trajectory of Airy beam by changing wedge-shaped slit angle

如图9所示. 但是这种控制方法系统实现比较困难, 晶体温度需要达到100℃甚至200℃以上才能满足要求, 改变方向后的艾里光束参数也发生变化, 是2束不同的艾里光束.

(iv) 利用特殊变换. 2012年, Jiang等人^[31]研究发现在产生艾里光束的基本装置前加上一个傅里叶透镜, 即可实现艾里光和高斯光束的相互变换, 且调节相关参数可改变艾里光的加速方向, 如图10所示. 此外, Zhou等人^[32]利用分数傅里叶变换也实现了艾里光加速轨迹的控制. 这种方法实现比较容易, 既能改变艾里光的加速方向, 也能改变艾里光的强度分布.

上述方法中, 旋转透镜和平移高斯光束的中心都必然要加入机械控制, 也就增加了系统的复杂性. 移动相位膜片的质心则仅通过计算机更换相位膜片即可实现, 但这一方法实现的偏转范围较小. 改变晶体梯度折射率、楔形结构的夹角或非线性光子晶体的参数可以方便地调节艾里光的加速方向, 实现任意形式的传输轨迹, 但系统比较复杂. 基于特殊变换的

方法需要在产生艾里光的系统之外额外增加光学系统, 且变换后的艾里光传输轨迹固定, 不适合实现动态控制. 因此上述方法都有一定的局限性.

1.3 艾里光阵列合成自聚焦

为了提高激光束的功率密度, 通常采用单光束聚焦和多光束合成的方法. 单光束聚焦通常利用透镜实现, 这种方式的缺点是焦距一般固定不变, 且激光束功率受材料功率承受能力的限制. 为了突破单光束聚焦的限制, 国内外学者提出了阵列激光在自由空间自聚焦的想法, 然而在艾里光出现之前所有的光束在自由空间中都是直线传输的, 不能在接收平面实现自聚焦. 艾里光的横向加速特性使得自由空间光束的自聚焦变为现实.

2010年, Efremidis^[33]首先在理论上提出产生自聚焦圆环形艾里光的方法, 然而圆环形艾里光本身只是一束光, 其自聚焦只能起到提高激光功率密度的目的, 不能提高激光的总功率. 为了同时提高自

图9 (网络版彩色)基于非线性光子晶体控制艾里光束加速轨迹的原理图(a)与实验结果(b)~(e)

Figure 9 (Color online) The schematics (a) and experimental results (b)~(e) of acceleration trajectory of Airy beam based on nonlinear photonic crystals

图10 (网络版彩色)艾里变换系统(a)与实验结果(b)~(c)

Figure 10 (Color online) Airy transform system (a) and experimental results (b)~(c)

聚焦激光束的功率和功率密度, 2013年, 张泽等人^[34]利用径向对称排列的4束和8束一维艾里光实验实现了合成自聚焦光束, 结果如图11所示. 表明艾里光阵列具有很好的自聚焦特性, 简单地增加或减少艾里光的数目就可实现自聚焦光束总功率的提高或降低, 功率扩展性好. 聚焦点可通过改变艾里光阵列的几何或光学参数方便地调节, 无需机械调节装置, 因而有很高的调节精度和速度. 此外, 他们还研究了多束二维艾里光的相干阵列合成, 并与高斯光的阵列合成进行了比较, 实验结果如图12所示^[35], 实验过程中的聚焦点约为几十厘米, 证明了艾里光阵列的合成效率比高斯光阵列的合成效率高得多.

1.4 艾里光的大气传输特性

2011年, Chu^[36]借助Tartarskii功率谱模型分析了艾里光在大气湍流中传输时其横向强度分布的演化规律, 结果表明艾里光的质心位置和偏移不受湍流

的影响; 并且当衰减系数较小时, 艾里光在湍流中传输时受扰动影响后的恢复能力比较强; 若湍流较强时, 艾里光将退化为离轴高斯光束, 退化速度与有限能量艾里光的衰减系数有关. 2012年, Xu等人^[37]采用静态相位法分析了艾里光的远场发散角, 得出艾里光的远场发散角和功率与其横向尺度因子和指数衰减因子密切相关的结论. 2013年, Tao等人^[38]用均方根束宽分析了有限能量艾里光在大气湍流中传输时的光束扩展效应, 选择了Non-Kolmogorov湍流模型, 给出了光束扩展的解析表达式, 并详细分析大气湍流的内、外尺度、强度以及艾里光横向尺度因子、指数衰减因子等对光束扩展的影响, 结果表明减小湍流内尺度或增大外尺度和湍流强度都会引起光束扩展加大, 而远场发散角则不受横向尺度因子和指数截断因子的影响, 这与Xu等人^[37]的分析结果相矛盾.

对于人们比较关注的光强闪烁, 2010年, Gu等人^[39]首先采用多相位屏法进行了数值模拟和分析,

图 11 (网络版彩色)艾里光阵列合成自聚焦光束的光强分布数值模拟. (a) 4束艾里光沿y轴光强分布在传播方向上的演化; (b1)~(b4)和(c1)~(c4)分别为4束和8束一维艾里光阵列合成自聚焦光束在4个不同位置横截面上的强度分布

Figure 11 (Color online) The numerical simulation of intensity distribution of self-focusing beam synthesized by airy array beams. (a) Evolution on the propagation directory of four airy beams' intensity distribution along y axis; (b1)~(b4) and (c1)~(c4) intensity distribution of self focusing beam synthesized by four and eight 1D airy array beams at different locations of cross-section

图 12 (网络版彩色)(a1)~(c1)分别为入射面上4束高斯光、一维艾里光和二维艾里光的阵列分布; (a2)~(c2) 对应光束阵列的演化结果; (a3)~(c3) 对应的光强分布

Figure 12 (Color online) (a1)~(c1) Four Gaussian, 1D airy beam and 2D airy beam array distribution on the incident surface. (a2)~(c2) Evolution results corresponding to beam array; (a3)~(c3) intensity distribution corresponding to beam array

模拟了4束艾里光经过相对独立的大气湍流信道在 3 km远的接收面上光斑完全重叠, 并证明了艾里光阵列传输可使闪烁效应减小至理论极限. 2013年, Eyyuboğlu^[40]采用Rytov方法推导出了艾里光的面闪烁效应, 明确指出艾里光的闪烁要明显小于高斯光束的闪烁, 并且指数截断因子越小, 光强闪烁就越小.

Wen等人^[41]对部分相干艾里光在大气湍流中的光束漂移进行了理论分析. 采用广义惠更斯-菲涅尔积分, 推导出了部分相干艾里光的二阶矩表达式, 进而得到其光束漂移的理论公式. 数值分析结果表明增大横向尺度因子或减小指数截断因子和相干长度的, 都会减小部分相干艾里光的光束漂移.

艾里光束具有横向加速特性, 若将多束艾里光按径向对称分布排列(图18), 那么它们在传输过程中将会做横向加速, 所携带的能量将逐渐汇聚, 实现自聚焦. 对于艾里光阵列合成的大气传输, Chu等人^[42]

首先对其相干合成光束在真空中的传输特性进行了研究, 表明艾里光可通过阵列合成获得高功率. 在此基础上, Wen等人^[43]研究了相干合成艾里光在大气湍流中的传输特性, 结果表明相干合成艾里光在弱大气湍流中能保持其横向强度分布不变沿抛物线轨迹传输数千米的距离, 而在中等湍流或强湍流情况下, 相干合成艾里光的无衍射特性和横向加速特性将在较短的传输距离内退化. 2014年, Chen等人^[44]对径向对称艾里光阵列在大气湍流中的相干合成与非相干合成传输特性进行了研究, 结果表明艾里光阵列相干和非相干合成光束在大气信道中都能实现自聚焦(图13和14). 在弱湍流情况下, 相干合成的自聚焦效果要优于非相干合成; 强湍流情况下, 相干合成与非相干合成的大气传输特性没有明显区别. 减小艾里光的横向尺度因子时, 自聚焦的距离会缩短, 焦点上的平均峰值强度也会降低; 而减小艾里光的指数衰

图13 (网络版彩色)四束二维艾里光径向对称分布排列的示意图
Figure 13 (Color online) The schematic of four 2D airy beams of radial distribution

减因子时, 焦点上的平均峰值强度将增大。

2 艾里光用于FSO系统的可行性

自由空间光通信(FSO)以其高带宽、高速率、保密性好等优点被认为是具有良好应用前景的新型无线通信方式, 但大气效应对光束传输的影响已成为实现远距离、高速率FSO通信系统的瓶颈, 也是多年来困扰科学和工程领域研究人员的难题。

大气效应主要包括大气衰减和大气湍流效应2个方面。针对大气衰减问题, 国内外学者采用了压缩光束发散角、提高发射功率、使用高灵敏度探测器、采用更好的数据调制等方法。但这些方法不能改变本质问题, 实际效果不够理想, 在工程应用中有很大的局限性^[45,46]。例如: 提高半导体激光器的发射功率会

图14 (网络版彩色)相干合成艾里光阵列平均强度分布纵截面随艾里光参数的变化
Figure 14 (Color online) The average intensity distribution of coherent synthesis airy array beam changing with parameters. (a) $C_n^2=10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $w_0=12 \text{ mm}$, $a=0.1$; (b) $C_n^2=10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $w_0=6 \text{ mm}$, $a=0.1$; (c) $C_n^2=10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $w_0=12 \text{ mm}$, $a=0.05$

图15 (网络版彩色)非相干合成艾里光阵列平均强度分布纵截面随艾里光参数的变化
Figure 15 (Color online) The average intensity distribution of incoherent synthesis airy array beam changing with parameters. (a) $C_n^2=10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $w_0=12 \text{ mm}$, $a=0.1$; (b) $C_n^2=10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $w_0=6 \text{ mm}$, $a=0.1$; (c) $C_n^2=10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $w_0=12 \text{ mm}$, $a=0.05$

导致调制带宽降低;减小光束发散角会加大跟踪、瞄准的难度;提高接收机的灵敏度非常困难.特别是在恶劣天气下,这些措施的作用非常有限,甚至无效.针对抑制大气湍流效应的问题,目前已经提出的主要技术包括自适应光学技术^[47,48]、多光束传输技术^[49,50]、部分相干光传输技术^[51,52]等.这些技术虽然在一定程度上克服了大气湍流对光束传输的影响,但在向实用化迈进时仍存在许多问题需要深入研究.例如:自适应光学技术虽被认为是从根本上消除大气湍流影响的一条技术途径,但是波前的探测和重构还存在很多问题;大孔径接收会增加接收端机的尺寸和重量,在设计和装配时难度较大;多光束传输技术由于增加发射镜数会使光学系统更加复杂,伺服控制和共轴更加困难;部分相干光的发散角较大,接收面上光斑扩展较大,能量利用率低.

为什么上述技术手段难以从根本上解决大气效应问题呢?主要是这些技术手段都仅仅从激光大气传输的某一机理出发,通过某种手段来减弱大气影响的程度,没有从FSO系统的光源本身是否具有抑制大气效应能力的角度考虑问题,是大气效应问题难以解决的一个重要原因.目前的FSO系统都是基于高斯光束传输信息.高斯光束作为信息载体,自身对衍射没有任何的抑制能力,随传输距离的增加光斑面积增大,使得接收面能量利用率低;高斯光束在传输过程中若被其路径上的微粒遮挡住一部分后不能恢复其光强分布,会引起接收端解码错误,增大误码率.当采用高斯光束阵列传输时,在接收面上各子光束很难完全重叠在一起,光斑面积大,功率密度低.而采用艾里光作为FSO系统的信息载波,恰好能弥补采用高斯光束存在的这些问题.

根据上一节对艾里光研究进展的分析,与高斯光束相比,艾里光具有如下一些优点.

(1) 艾里光的无衍射特性使其在远距离传输时光束扩展小.接收面上小直径的光斑有利于提高能量利用率,增强接收信噪比,同时还能提高通信的保密性.

(2) 艾里光的自愈能力使其在湍流环境中传输时的抗干扰能力强于高斯光束.湍流条件下若艾里光被障碍物遮挡住一部分,经过一段传播距离后其强度分布仍能自动恢复,保证了其在扰动环境中传输时强度分布轮廓受到的影响较小,降低FSO系统的误码率.

(3) 艾里光的横向加速特性使得自由空间的光

束自聚焦成为现实.径向对称分布的艾里光阵列其各个子光束能沿相对独立的弯曲路径远距离传输后在接收面实现自聚焦,提高了接收面上的光功率和功率密度,克服传统高斯光束在远场接收平面因光斑过大而导致能量利用率低的问题.这种方法产生的自聚焦光束有2个优点:简单地增加合成艾里光的数目就可以提高自聚焦光束的总功率,具有良好的功率可扩展性;可以非机械地调节光束焦距的长短,具有很高的调节速度和精度,适合移动目标之间的通信应用.此外,由于不需要光学天线来聚焦,因此可以在接收端省去光学天线,减小了接收端光学系统的体积、重量,节约了系统成本.

(4) 径向对称分布艾里光阵列对于大气湍流造成的光束扩展、光强闪烁和光束漂移等大气效应的抑制作用强于传统的高斯光束,有利于提高远距离FSO系统的通信质量.

因此,若将艾里光用作FSO系统的信息载波,利用艾里光的横向加速特性,径向对称分布排列的艾里光子光束将能沿各自相对独立的路径传输后在接收探测器上实现完全重叠聚焦,不仅可保证远距离探测器上具有的功率密度,而且还能抑制传输路径上的大气效应,有望为实现远距离、高速率的FSO系统提供一条可行的途径.然而,由于艾里光的研究近年来刚刚起步,对于其产生方法、大气传输特性、加速轨迹控制和阵列自聚焦等方面的研究还很不完善,存在以下问题还需要深入研究.

(1) 高功率艾里光的产生方法.虽然目前已有多种方法可以产生艾里光,但是它们的功率都比较低,在湍流环境中由于衍射和能量衰减的影响很难实现远距离应用.即使采用阵列合成自聚焦,由于各子光束经远距离传输后能量极大地降低,自聚焦效果也会变差.

(2) 艾里光加速轨迹大范围动态控制方法.目前已有的艾里光加速轨迹控制方法大多调节范围小,或者因加入了机械操作使得调节速度慢,或者因系统复杂不利于实用.

(3) 艾里光大气传输特性的深入分析.对艾里光在大气湍流环境中的传输目前还仅限于寥寥数篇文献,研究结果还属于初步的理论分析和定性的现象观察.

(4) 对艾里光阵列合成自聚焦光束的特性研究还不够深入.对艾里光阵列光学参数和几何参数的优化,在远距离上艾里光的演化、自聚焦情况等问题

还需要深入讨论.

3 结论

本文从艾里光束的产生方法、加速轨迹控制、阵列合成自聚焦和大气传输特性几个方面回顾和分析了艾里光束的研究进展. 基于艾里光束独特的传输特性, 若从根源上对传统的FSO系统进行改进, 采用具有无衍射、自愈和横向加速特性的艾里光束代替传统高斯光束作为光载波, 结合多光束传输技术, 通

过径向对称分布艾里光阵列合成自聚焦光束, 不仅能提高接收面上的光强, 而且能有效抑制光束扩展、光强衰减、光强闪烁和光束漂移等大气效应, 为突破当前FSO系统难以实现远距离、高速率通信的难题提供一条可行的技术途径. 然而, 目前对艾里光束的研究主要集中于近距离传输和应用上, 对于在远距离、大气环境中的传输和应用研究还较少. 相信随着对艾里光束研究的深入, 基于艾里光束的远距离、高速率FSO系统将能在通信领域绽放异彩.

参考文献

- Berry M, Balazs N. Nonspreading wave packets. *Am J Phys*, 1979, 47: 264–267
- Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, et al. Observation of accelerating airy beams. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 213901
- Siviloglou G A, Christodoulides D N. Accelerating finite energy Airy beams. *Opt Lett*, 2007, 32: 979–981
- Yue Y Y, Xiao H, Wang Z X, et al. Research on diffraction and self-acceleration of Airy beam (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2013, 62: 044205 [乐阳阳, 肖寒, 王子潇, 等. 关于 Airy 光束衍射及自加速性质的研究. *物理学报*, 2013, 62: 044205]
- Chu X X, Zhou G Q, Chen R P. Analytical study of the self-healing property of Airy beams. *Phys Rev*, 2012, 85: 013815
- Rogel-Salazar J, Jimenez-Romero H, Chavez-Cerda A S. Full characterization of Airy beams under physical principles. *Phys Rev A*, 2014, 89: 023807
- Polynkin P, Kolesik M, Moloney J V, et al. Curved plasma channel generation using ultraintense Airy beams. *Science*, 2009, 324: 229–232
- Baumgartl J, Mazilu M, Dholakia K. Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets. *Nat Photonics*, 2008, 2: 575–578
- Cheng H, Zang W P, Tian J G. Study on optical trapping and propulsion of small particles by Airy beam (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2011, 31: s100405 [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. *光学学报*, 2011, 31: s100405]
- Abdollahpour D, Suntsov S, Papazoglou D, et al. Spatiotemporal Airy light bullets in the linear and nonlinear regimes. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 253901
- Chen C Y, Yang H M, Mohsen K, et al. Propagation of radial Airy array beams through atmospheric turbulence. *Opt Laser Eng*, 2014, 52: 106–114
- Ji X L, Halil T, Eyyuboğlu H T, et al. Propagation of an Airy beam through the atmosphere. *Opt Express*, 2013, 21: 2154–2164
- Zhang Z, Hu Y, Zhao J Y, et al. Research progress and application prospect of Airy beams (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 3514–3520 [张泽, 胡毅, 赵娟莹, 等. 艾里光束研究进展与应用前景. *科学通报*, 2013, 58: 3514–3520]
- Ellenbogen T, Voloch N, Ganany-Padowicz A, et al. Nonlinear generation and manipulation of Airy beams. *Nat Photonics*, 2009, 3: 395–398
- Dolev I, Ellenbogen T, Voloch-Bloch N. Control of free space propagation of Airy beams generated by quadratic nonlinear photonic crystals. *App Phys Lett*, 2009, 95: 201112
- Dai H T, Sun X W, Luo D, et al. Airy beams generated by a binary phase element made of polymer-dispersed liquid crystals. *Opt Express*, 2009, 17: 19365
- Dai H T, Sun X W, Luo D, et al. Electrically switchable finite energy Airy beams generated by a liquid crystal cell with patterned electrode. *Opt Commun*, 2010, 283: 3846–3849
- Cao R, Yang Y, Wang J G, et al. Microfabricated continuous cubic phase plate induced Airy beams for optical manipulation with high power efficiency. *Appl Phys Lett*, 2011, 99: 261106
- Salandrino A, Christodoulides D N. Airy plasmon: A nondiffracting surface wave. *Opt Lett*, 2012, 35: 2082–2084
- Minovich A, Klein A E, Janunts N, et al. Generation and near-field imaging of Airy surface plasmon. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 116802
- Longhi S. Airy beams from a microchip laser. *Opt Lett*, 2011, 36: 716–718
- Porat G, Dolev I, Barlev O, et al. Airy beam laser. *Opt Lett*, 2011, 36: 4119–4121
- Cottrell D M, Davis J A, Hazard T M. Direct generation of accelerating Airy beams using a 3/2 phase-only pattern. *Opt Lett*, 2009, 34: 2634–2636

- 24 Guo C S, Wang S Z, Rong Z Y, et al. Local spatial frequency of Airy accelerating beams and its applications in the beam design (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2013, 62: 084201 [国承山, 王淑贞, 荣振宇, 等. Airy 加速光束的局域空间频率及其在光束设计中的应用. *物理学报*, 2013, 62: 084201]
- 25 Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, et al. Ballistic dynamics of Airy beams. *Opt Lett*, 2008, 33: 207–209
- 26 Hu Y, Zhang P, Lou C B, et al. Optimal control of the ballistic motion of Airy beams. *Opt Lett*, 2010, 35: 2260–2262
- 27 Zhang P, Wang S, Liu Y M. Plasmonic Airy beams with dynamically controlled trajectories. *Opt Lett*, 2011, 36: 3191–3193
- 28 Ye Z Y, Liu S, Lou C B. Acceleration control of Airy beams with optically induced refractive index gradient. *Opt Lett*, 2011, 36: 3230–3232
- 29 Liu W, Dragomir N, Ilya V, et al. Plasmonic Airy beam manipulation in linear optical potentials. *Opt Lett*, 2011, 36: 1164–1166
- 30 Liu X W, Li J Z, Chen H Y. The deflected angle and reflected displacement of Airy beams. *Optik*, 2013, 124: 6519–6522
- 31 Jiang Y F, Huang K K, Lu X H. The optical Airy transform and its application in generating and controlling the Airy beam. *Opt Commun*, 2012, 285: 4840–4843
- 32 Zhou G Q, Chen R P, Chu X X. Fractional Fourier transform of Airy beams. *Appl Phys B*, 2012, 109: 549–556
- 33 Efremidis N K, Christodoulides D N. Abruptly autofocusing waves. *Opt Lett*, 2010, 35: 4045–4047
- 34 Zhang Z, Liu J J, Zhang P, et al. Generation of autofocusing beams with multi-Airy beams (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2013, 62: 034209 [张泽, 刘京郊, 张鹏, 等. 多艾里光合成自聚焦光束的实验实现. *物理学报*, 2013, 62: 034209]
- 35 Zhang Z, Ye Z Y, Song D H. Repositioning and steering laser beam power via coherent combination of multiple Airy beams. *Appl Opt*, 2013, 52: 8512–8517
- 36 Chu X X. Evolution of an Airy beam in turbulence. *Opt Lett*, 2011, 36: 2701–2703
- 37 Xu Y Q, Zhou G Q. The far-field divergent properties of an Airy beam. *Opt Laser Tech*, 2012, 44: 1318–1323
- 38 Tao R M, Si L, Ma Y X. Average spreading of finite energy Airy beams in non-Kolmogorov turbulence. *Opt Laser Eng*, 2013, 51: 488–492
- 39 Gu Y, Gbur G. Scintillation of airy beam arrays in atmospheric turbulence. *Opt Lett*, 2010, 35: 3456–3458
- 40 Eyyuboğlu H T. Scintillation behavior of Airy beam. *Opt Laser Tech*, 2013, 47: 232–236
- 41 Wen W, Chu X X. Beam wander of partially coherent Airy beams. *J Modern Opt*, 2014, 61: 379–384
- 42 Chu X, Liu Z, Zhou P. Generation of a high-power Airy beam by coherent combining technology. *Laser Phys Lett*, 2013, 10: 125102
- 43 Wen W, Chu X X, Ma H T. The propagation of a combining Airy beam in turbulence. *Opt Commun*, 2015, 336: 326–329
- 44 Chen C Y, Yang H M, Kavehrad M, et al. Propagation of radial Airy array beams through atmospheric turbulence. *Opt Laser Eng*, 2014, 52: 106–114
- 45 Deng P, Yuan X H, Huang D X. Scintillation of a laser beam propagation through non-Kolmogorov strong turbulence. *Opt Commun*, 2011, 285: 880–887
- 46 Jitendra S, Naresh K. Performance analysis of different modulation format on free space optical communication system. *Optik*, 2013, 124: 4651–4654
- 47 Fu F X, Zhang B. The influence of high-frequency phase distortion on the phase correction effect in atmospheric turbulence. *Optik*, 2014, 125: 360–365
- 48 Li M, Lin S, Li S M, et al. Suppression of fluctuation on the angle of arrival for free-space optical communication. *Optoelectron Lett*, 2012, 18: 0297–0300
- 49 Polynkin P, Peleg A, Klein L. Optimized multiemitter beams for free-space optical communications through turbulent atmosphere. *Opt Lett*, 2007, 32: 885–887
- 50 Peleg A, Moloney J V. Scintillation reduction by use of multiple Gaussian laser beams with different wavelengths. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19: 883–889
- 51 David V, Xiao X F. A brief review of spatially partially coherent beams for FSO communications. *Proc SPIE*, 2009, 7200: 72000C
- 52 Vorontsov M A, Dudorov V V, Zyryanova M O. Bit error rate in free-space optical communication systems with a partially coherent transmitting beam. *Atmos Ocean Opt*, 2013, 26: 185–189

Research progress of Airy beam and feasibility analysis for its application in FSO system

CHU XingChun, ZHAO ShangHong, CHENG Zhen, LI YongJun, LI RuiXin & FANG YingWu

School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China

As one member of non-diffraction light family, Airy beam has attracted a great deal of interests due to its unique non-diffraction, transverse-accelerating and self-healing properties. And it has potential applications in many fields such as optical micro-particles manipulation, generation of optical bullets, creating curved electron beams, formation of Airy beam lasers and so on. This paper briefly reviews the recent development of Airy beams from four aspects: generating method, controlling of accelerating trajectory, auto-focusing of Airy beams arrays and propagating properties in atmospheric channel. The main methods of Airy beam generation are summarized and a deep analysis for each method is made from the cost of the system, how complex to come true and potential of applications, and give some suggestions for improving and perfecting. It shows that the methods with low cost of the system, easy to come true and the broad application prospect are hoped. This paper summarizes the main methods of Airy beam's propagation trajectory control. And make a analysis for each method controlling principle of propagation trajectory in acceleration direction, self-bending degree, peak intensity position and so on. This paper makes a conclusion of advantages and disadvantages for each method. The research show that the Airy beam's propagation trajectory control method by changing system parameters, that is simple and easily success, but cannot reverse acceleration direction and controlling ranges is limited. The control methods based on refractive-index gradient and the special medium, nonlinear photonic crystals, can reverse acceleration direction but difficultly come true. The acceleration direction and intensity distribution of Airy beam's propagation trajectory can be controlled by the special transform and that easily come true. The research methods of Airy beam and Airy array beams' propagation properties at the atmosphere turbulence are based on the Huygens-Fresnel principle, the multiple phase screens and Perturbation approximation methods and so on. The research show that the propagation properties of Airy beam at atmosphere, which include beams expand, beam drifts and Self focusing ability, are better than Gaussian beams. Furthermore, the properties of Gaussian beam and Airy beam were compared from the view of communication. The feasibility to use Airy beam as information carrier of FSO system was analyzed. As a conclusion, it was pointed out that auto-focusing Airy beams that combined by radial symmetrically distributing arrays cannot only enhance the light intensity at receive plane of FSO system, but also suppress effectively atmospheric effects such as beam spreading, scintillation, beam wander, etc. It would be a promising approach to use auto focusing Airy beams as light source to develop long rang, high bit rate FSO system.

Airy beams, generating method, trajectory controlling, auto-focusing, free-space optical communication, atmospheric effects

doi: 10.1360/N972015-00265