

文章编号 1672-6634(2024)01-0009-07

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2023090012

部分相干径向偏振环形艾里涡旋光束 在大气湍流中的传输特性研究

张华立¹, 刘泽琳¹, 罗亚梅^{1,2}, 张汉乐³, 雍康乐^{1,2}

(1. 西南医科大学 医学信息与工程学院, 四川 泸州 646000; 2. 西南医科大学 医工医信融合与转化医学泸州市
重点实验室, 四川 泸州 646000; 3. 北京航空航天大学 仪器科学与光电学院, 北京 100191)

摘要 为了探究部分相干径向偏振环形艾里涡旋光束在大气湍流中传输时的光强闪烁特性, 利用分步相位屏法研究了其在各项异性湍流中的传输特性。结果显示: 随着传输距离的增大, 闪烁指数首先逐渐增大, 当达到最大值后再逐渐减小。当传输距离一定时, 闪烁指数随着相干长度的增大而增大。随着截断因子的减小, 拓扑荷数的增大, 闪烁指数减小。随着相干长度、拓扑荷数的增大, 部分相干径向偏振环形艾里涡旋光束保持偏振特性的能力增强。

关键词 大气湍流; 部分相干; 环形艾里涡旋光束; 闪烁指数

中图分类号 O439

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Propagation Characteristics of Partially Coherent Radially Polarized Ring Airy Vortex Beams in Atmospheric Turbulence

ZHANG Huali¹, LIU Zelin¹, LUO Yamei^{1,2},
ZHANG Hanle³, YONG Kangle^{1,2}

(1. School of Medical Information and Engineering, Southwest Medical University, Luzhou 646000, China; 2. Medical Engineering & Medical Informatics Integration and Transformational Medicine Key Laboratory of Luzhou, Southwest Medical University, Luzhou 646000, China; 3. School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract In order to investigate the intensity scintillation characteristics of a partially coherent radially polarized ring Airy vortex beam (PCRPRVB) in anisotropic turbulence, the propagation characteristics are investigated by using the step-by-step phase screen method. The results show that as the propagation distance increases, the scintillation index first increases gradually and then decreases when it reaches the maximum value. When the transmission distance is fixed, the scintillation index increases with the increase of coherence length. As the truncation factor decreases and the topological charge increases, the scintillation index decreases. The ability of the PCRPRVB to maintain polarization state is enhanced with

收稿日期: 2023-09-25

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(62105016); 西南医科大学人才引进科研启动经费(20/00040185); 西南医科大学校级项目(2021ZKQN113); 西南医科大学大学生创新创业训练计划项目(S202210632308) 资助

通信作者: 雍康乐, 男, 汉族, 博士, 讲师, 研究方向: 奇点光束在非均匀介质中传输, E-mail: kangle@swmu.edu.cn.

the increase of coherence length and topological charge.

Key words atmospheric turbulence; partially coherent; ring Airy vortex beam; scintillation index

0 引言

自由空间光通信(free-space optical communication, FSOC)技术由于其数据传输速率高、数据容量大等优势,使 FSOC 成为一种极具发展前景的通信技术^[1]。目前遇到的最大挑战之一就是大气湍流,光源波束在大气中传输时受大气湍流的影响,导致光束光强闪烁增加^[2,3],从而引起信噪比降低^[4],误码率增加^[5],严重影响通信质量。

不同类型光束受大气湍流的影响是不同的,使用受湍流影响小的光束可以大大提高通信质量。艾里光束(Airy)由于其无衍射、自聚焦、自愈合等特性^[6-8],引起了研究人员的高度关注。Eyyuboglu 利用 Rytov 近似,研究了 Airy 光束在弱湍流中的闪烁特性,发现当光源功率相同时,Airy 光束的闪烁指数比高斯光束的小^[9]。李怡等人^[10]研究了径向阵列艾里涡旋光束在倾斜大气湍流中的漂移特性,结果表明,径向阵列艾里光束的光束漂移现象比环形阵列艾里涡旋光束受湍流的影响小。李亚清等人^[11]研究了环形艾里高斯涡旋光束在大气湍流中传输的光强演化特性。Zhang 等人^[12]研究了环形艾里涡旋光束在大气湍流中斜程传输时关键参数对孔径平均闪烁指数的影响。Chun^[13]研究了以艾里波束为载波的自由空间通信系统复指数威布尔模型误码率,指出在相同条件下,以艾里光束为载体的 FSOC 链路的平均误码率明显优于以高斯光束为载体的 FSOC 链路。

偏振是光波非常重要的一个特性,偏振光束在抵抗大气湍流影响时也具有其优势。目前,对于径向偏振环形艾里涡旋光束在大气湍流中传输的光强闪烁特性还未见有文献报到,本文研究了部分相干径向偏振环形艾里涡旋光束在各项异性湍流中传输时的光强闪烁特性,本研究为以环形艾里涡旋光束为通信载波的研究提供了理论参考。

1 理论模型

考虑旁轴近似情况下,光束在大气湍流中传输时,光场 $E(x, y)$ 满足方程(1)

$$2ik \frac{\partial E}{\partial z} = \nabla_{\perp}^2 E + k^2 (n^2 - 1) E, \quad (1)$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长, $n = n_0 + \Delta n$ 为在自由空间中传输时大气的折射率, Δn 为大气湍流引起的折射率起伏。可以用傅里叶变换法求解该方程,也就是针对中等强度湍流的处理办法,即分步相位屏法。

$$E(r, z_n + \Delta z/2) = FFT^{-1} \left\{ FFT [E(r, z_n)] \times \exp \left[-\frac{i}{2k} \times \frac{\Delta z}{2} (\kappa_x^2 + \kappa_y^2) \right] \right\}, \quad (2)$$

$$E(r, z_n + \Delta z) = FFT^{-1} \left\{ FFT [E(r, z_n + \Delta z/2) \times \exp(-i\varphi)] \times \exp \left[-\frac{i}{2k} \times \frac{\Delta z}{2} (\kappa_x^2 + \kappa_y^2) \right] \right\}, \quad (3)$$

其中 FFT 和 FFT^{-1} 分别为傅里叶和逆傅里叶变换。 κ_x 和 κ_y 分别为 x 和 y 方向的空间波数。 φ 为由于大气湍流引起的相位扰动,其可以表示为

$$\varphi(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\kappa_x e^{i\kappa_x x} \int_{-\infty}^{+\infty} d\kappa_y e^{i\kappa_y y} \times a(\kappa_x, \kappa_y) \sqrt{\Phi_{\varphi}(\kappa_x, \kappa_y)}, \quad (4)$$

$a(\kappa_x, \kappa_y)$ 代表均值和方差分别为 0 和 1 的复随机矩阵, $\Phi_{\varphi}(\kappa_x, \kappa_y)$ 为大气湍流的相位频谱,可以由大气折射率功率谱 $\Phi_n(\kappa_x, \kappa_y)$ 得到湍流的相位频谱

$$\Phi_{\varphi}(\kappa_x, \kappa_y) = 2\pi k^2 \Delta z \Phi_n(\kappa_x, \kappa_y). \quad (5)$$

本文采用各项异性的大气折射率功率谱模型

$$\Phi_n(\kappa) = A(\alpha) C_n^2 \mu_{\text{eff}}^2 \frac{\exp \left[-(\mu_{\text{eff}}^2 \kappa_{xy}^2) / \kappa_l^2 \right]}{(\mu_{\text{eff}}^2 \kappa_{xy}^2 + \kappa_0^2)^{\alpha/2}}, \quad (6)$$

其中 C_n^2 为大气结构常数, $\kappa_{xy} = \sqrt{\mu_{\text{eff}}^2 (\kappa_x^2 + \kappa_y^2)}$, μ_{eff} 为等效各项异性参数, $\kappa_l = c(\alpha) / l_0$, $\kappa_0 = c(\alpha) / L_0$, 其中 l_0 和 L_0 分别为大气湍流内外尺度。 $A(\alpha) = (1/4\pi^2) \Gamma(\alpha - 1) \cos(\pi\alpha/2)$, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数, $c(\alpha) =$

$\{A(\alpha) \Gamma[(5-\alpha)/2] (2\pi)/3\}^{1/(\alpha-5)}$ 。 α 为各项异性湍流谱的幂指数。 $3 < \alpha < 5$, α 与海拔高度有关^[14]

$$\alpha(h) = \frac{\alpha_1}{1+(h/H_1)^{b_1}} + \frac{\alpha_2(h/H_1)^{b_1}}{1+(h/H_1)^{b_1}} \times \frac{1}{1+(h/H_2)^{b_2}} + \frac{\alpha_3(h/H_2)^{b_2}}{1+(h/H_2)^{b_2}}, \quad (7)$$

其中 h 表示海拔高度, 参数 $\alpha_1=11/3$, $\alpha_2=10/3$, $\alpha_3=5$, $H_1=2\ 000\text{ m}$, $H_2=8\ 000\text{ m}$, $b_1=15$ 以及 $b_2=20$ 。

由于分步相位屏法是基于光场(电场)来模拟的, 而部分相干光是一种统计意义上的光束, 不能将分步相位屏法直接应用于部分相干光束在湍流中的传输仿真。因此, 本文利用复相位屏法构建了部分相干光束, 然后再利用分步相位屏法模拟部分相干光束在湍流中的传输。部分相干径向偏振环形艾里涡旋光束在 $z=0\text{ m}$ 处的表达式为

$$E(r, \theta, z=0) = \frac{x_0}{w_0} E' e_x + \frac{y_0}{w_0} E' e_y, \quad (8)$$

其中 $r=\sqrt{x_0^2+y_0^2}$, (x_0, y_0) 为光源平面上点, e_x 和 e_y 分别为 x 和 y 方向的单位向量, $E'=E_0 T(x_0, y_0)$ 为部分相干环形艾里涡旋光束, $E_0(r, \theta, z=0) = \text{Ai}\left(\frac{R_0-r}{w_0}\right) \exp\left[b\left(\frac{R_0-r}{w_0}\right)\right] \times \exp(im\theta)$ 为完全相干的环形艾里涡旋光束, $\text{Ai}(\cdot)$ 为艾里函数, R_0 为环形艾里涡旋光束的主环半径, m 代表拓扑荷数, θ 表示方位角, b 表示截断因子, w_0 表示光束宽度。 $T(x_0, y_0)$ 表示带有特定空间相关特性的复相位屏, 相干度函数可以表示为

$$g(\Delta r_x, \Delta r_y) = \exp\left[-\frac{(x_1-x_2)^2 + (y_1-y_2)^2}{2\delta^2}\right], \quad (9)$$

其中 $\Delta r_x = x_1 - x_2$, $\Delta r_y = y_1 - y_2$, (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 分别为光源平面上的两个点, δ 为相干长度。对相干度函数进行傅里叶变换操作可得到空间频率谱^[15]

$$S(f_x, f_y) = \iint g(\Delta r_x, \Delta r_y) \exp[2\pi i(f_x \Delta r_x + f_y \Delta r_y)] d\Delta r_x d\Delta r_y, \quad (10)$$

其中 (f_x, f_y) 为空间频率, 利用零均值单位方差的复随机函数 $R(f_x, f_y)$ 对空间频率谱滤波可得到 $T'(f_x, f_y) = R(f_x, f_y) \sqrt{S(f_x, f_y)}$, $T'(f_x, f_y)$ 为复相位屏 $T(x_0, y_0)$ 的傅里叶变换, 因此, 对 $T'(f_x, f_y)$ 做拟傅里叶变换可得到复相位屏 $T(x_0, y_0)$ 。

当光束在大气湍流中传输时会由于大气湍流的影响发生光强起伏抖动, 闪烁指数常用来定量评价光束光强波动的程度, 由于孔径平均闪烁指数能更好地反映强度波动的统计特征, 且比轴上闪烁指数更稳定, 因此本文选择其作为评价参数。孔径平均闪烁指数的定义为^[16]

$$\sigma_I^2(R_s) = \frac{\left\langle \left(\int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} I r dr d\theta \right)^2 \right\rangle}{\left\langle \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} I r dr d\theta \right\rangle^2} - 1, \quad (11)$$

I 表示光强, $\langle \rangle$ 表示系综平均, r 为极坐标下的径向距离, θ 为极角, R_s 为计算闪烁指数的接收孔径半径。

对于偏振光束而言, 偏振度是一个非常重要的参数, 偏振度一般用 Stokes 参量来表示^[17]

$$S_0 = \langle |E_x|^2 \rangle + \langle |E_y|^2 \rangle, S_1 = \langle |E_x|^2 \rangle - \langle |E_y|^2 \rangle, S_2 = \langle 2\text{Re}(E_x^* E_y) \rangle, S_3 = \langle 2\text{Im}(E_x^* E_y) \rangle, \quad (12)$$

$\text{Re}(\cdot)$ 和 $\text{Im}(\cdot)$ 分别为实部和虚部, 对于完全偏振光, Stokes 参量之间满足关系 $S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = S_0^2$, 对于部分偏振光, $0 < S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 < S_0^2$ 。根据偏振度的定义, 偏振度可以表示为

$$P(x, y, z) = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}. \quad (13)$$

2 分析与讨论

本文采用分步相位屏法, 编制了部分相干径向偏振环形艾里涡旋光束在大气湍流中传输的程序, 数值

求解方程(1)。在以下的模拟计算中,无特别说明情况下,参数设置为:波长 $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$, $w_0=2\ \text{cm}$, $R_0=7\ \text{cm}$, $\mu_{\text{eff}}=3$, $\Delta z=200\ \text{m}$, $h=3\ 000\ \text{m}$,相干长度 $\delta=3\ \text{mm}$, $C_n^2=1\times 10^{-14}\ \text{m}^{-2/3}$, $R_s=1.5\ \text{cm}$ 。本文中光强、闪烁指数、偏振度都是1 000次独立计算后的平均。

首先分析传输过程中光强的变化规律,如图1所示,当传输距离为1 000 m时,部分相干径向偏振环形艾里涡旋光束保持中空结构,相干长度 $\delta=1\ \text{mm}$ 的光束光强旁瓣较弱,相干长度 $\delta=3\ \text{mm}$ 的光束光强旁瓣很多且强度较大。随着传输距离的增大,光束旁瓣逐渐消失,轴上光强逐渐增大,最终涡旋光束退化成高斯状分布。 $\delta=3\ \text{mm}$ 的光束退化成高斯光束的距离比 $\delta=1\ \text{mm}$ 的更长。这说明相干长度越大,即相干性越好的PCRPAVB保持涡旋特性的能力越强。当相干长度 $\delta\rightarrow\infty$ 时,PCRPAVB变为完全相干的径向偏振环形艾里涡旋光束,此时,光束轴上光强为零,光束光强呈中空结构。随着相干长度的减小,轴上光强逐渐增大。这一结论与文献^[18]中的结论一致。

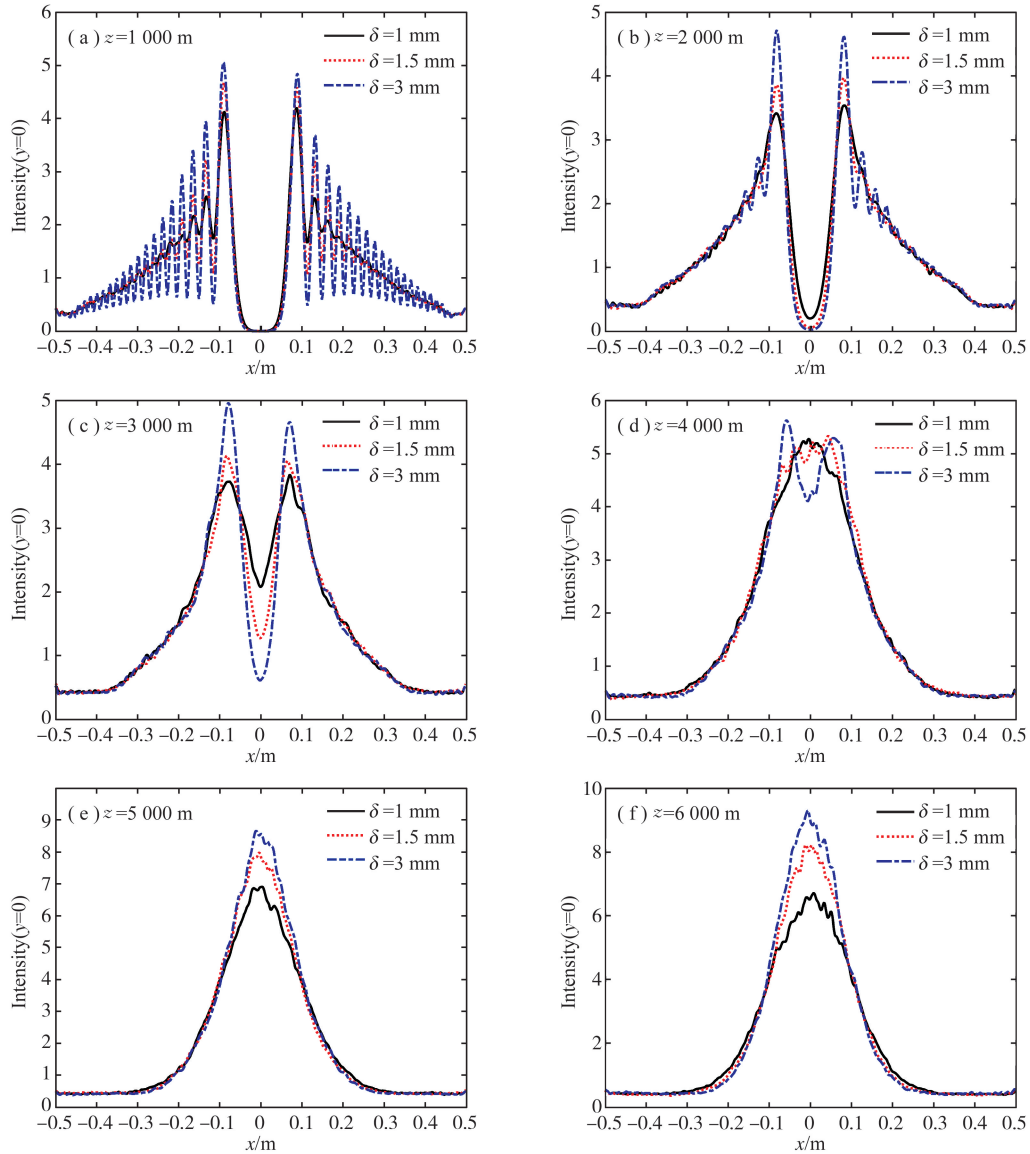


图1 不同相干长度的光束在大气湍流中不同传输距离时的一维光强分布

Fig. 1 One-dimensional intensity distribution of beams with different coherence lengths at distinct distances in atmospheric turbulence

为探究光源的相干性是否对抵抗闪烁指数效应有影响,我们研究了不同相干长度条件下的孔径平均闪烁指数。如图2所示,随着传输距离的增大,闪烁指数逐渐增大,这说明随着传输距离的增大,部分相干径向偏振环形艾里涡旋光束受大气湍流的影响增大,光束质量变差。当传输距离为2 000~3 000 m时,闪烁指

数达到最大值。当传输距离进一步增大,闪烁指数逐渐减小,这是由于大气湍流的影响,光束的中空结构被破坏,光束退化成高斯状,闪烁指数降低。当传输距离一定时,闪烁指数随着相干长度的增大而增大。这表明可以利用降低光源相干性的办法减小大气湍流闪烁效应的影响^[19]。

图 3 为不同拓扑荷数时,传输距离对闪烁指数的影响。当传输距离小于 3 000 m 时,拓扑荷数越大闪烁指数越小,这说明拓扑荷数越大的光束抵抗大气湍流的能力越强。这是由于拓扑荷数越大,对应的轨道角动量就越大,光子在与湍流作用时其运动状态就越不容易改变。当传输距离大于 3 000 m 时,拓扑荷数越小的光束其闪烁指数越小。由于拓扑荷数越小的光束其光束中空结构越容易被破坏,光束越先退化成类高斯状,因此,其闪烁指数越小。

截断因子是环形艾里涡旋光束一个重要参数,图 4 为不同传输距离时,截断因子对闪烁指数的影响。总体来看, $b=0.1$ 的光束闪烁指数最小,说明其光束抵抗大气湍流的能力最强。当传输距离为 3 000 m 时, $b=0.1$ 的光束闪烁指数起伏最大。因为 $b=0.1$ 的光束自聚焦效应最强,自聚焦、涡旋特性与大气湍流之间相互作用引起闪烁指数较大的起伏。

大气湍流结构常数 C_n^2 表示大气湍流的强度, C_n^2 越大表示湍流强度越大。如图 5 所示,当传输距离小于 3 000 m 时,随着 C_n^2 的增大闪烁指数增大,光束质量变差。当传输距离大于 3 000 m 后,大气湍流强度对闪烁指数无明显影响。这是由于闪烁指数达到饱和后,大气湍流强度对闪烁指数的影响很小。

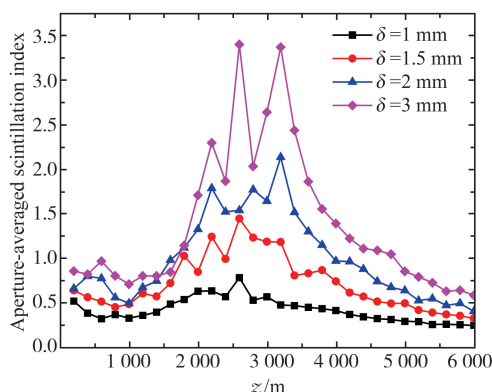


图 2 不同相干长度时孔径平均闪烁指数随着传输距离的变化

Fig. 2 Aperture-averaged scintillation index versus propagation distance for different coherence lengths

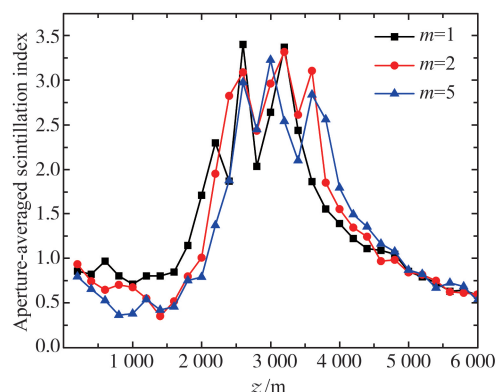


图 3 不同拓扑荷数时孔径平均闪烁指数随着传输距离的变化

Fig. 3 Aperture-averaged scintillation index versus propagation distance for different topological charge

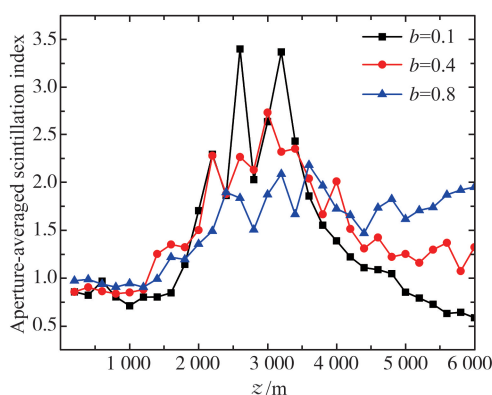


图 4 不同截断因子时孔径平均闪烁指数随着传输距离的变化

Fig. 4 Aperture-averaged scintillation index versus propagation distance for different truncation factor

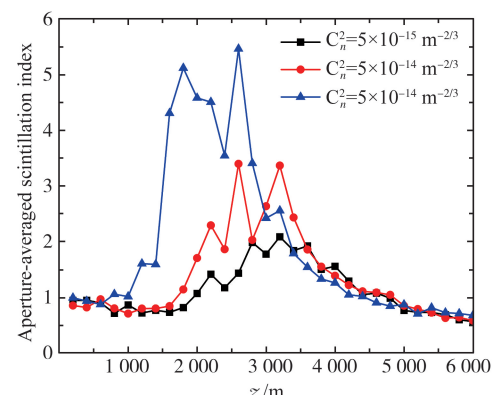


图 5 不同湍流强度时孔径平均闪烁指数随着传输距离的变化

Fig. 5 Aperture-averaged scintillation index versus propagation distance for different atmospheric turbulence strength

偏振度也是偏振光束非常重要的一个参数。因此,有必要研究部分相干径向偏振环形艾里涡旋光束经过大气湍流后的偏振度。如图 6 所示,在光轴附近偏振度出现了下降峰,随着传输距离的增大,下降峰的宽度逐渐增大。当传输距离固定时,相干长度越大,下降峰的宽度越小。这说明激光的相干性越好其抵抗退偏

的能力就越强。

图 7 为传输距离为 3 000 m 时,不同参数对偏振度的影响。拓扑荷数对偏振度的影响主要体现在光轴上。拓扑荷数越大其抵抗退偏效应的能力就越强。截断因子 $b=0.8$ 时,其偏振度的边缘变得较差,此时光束接近部分相干径向偏振光束,其抵抗退偏的能力比部分相干径向偏振环形艾里涡旋光束弱。大气湍流强度对偏振度的影响很明显,随着湍流强度的增大,其光束退偏效应越明显。

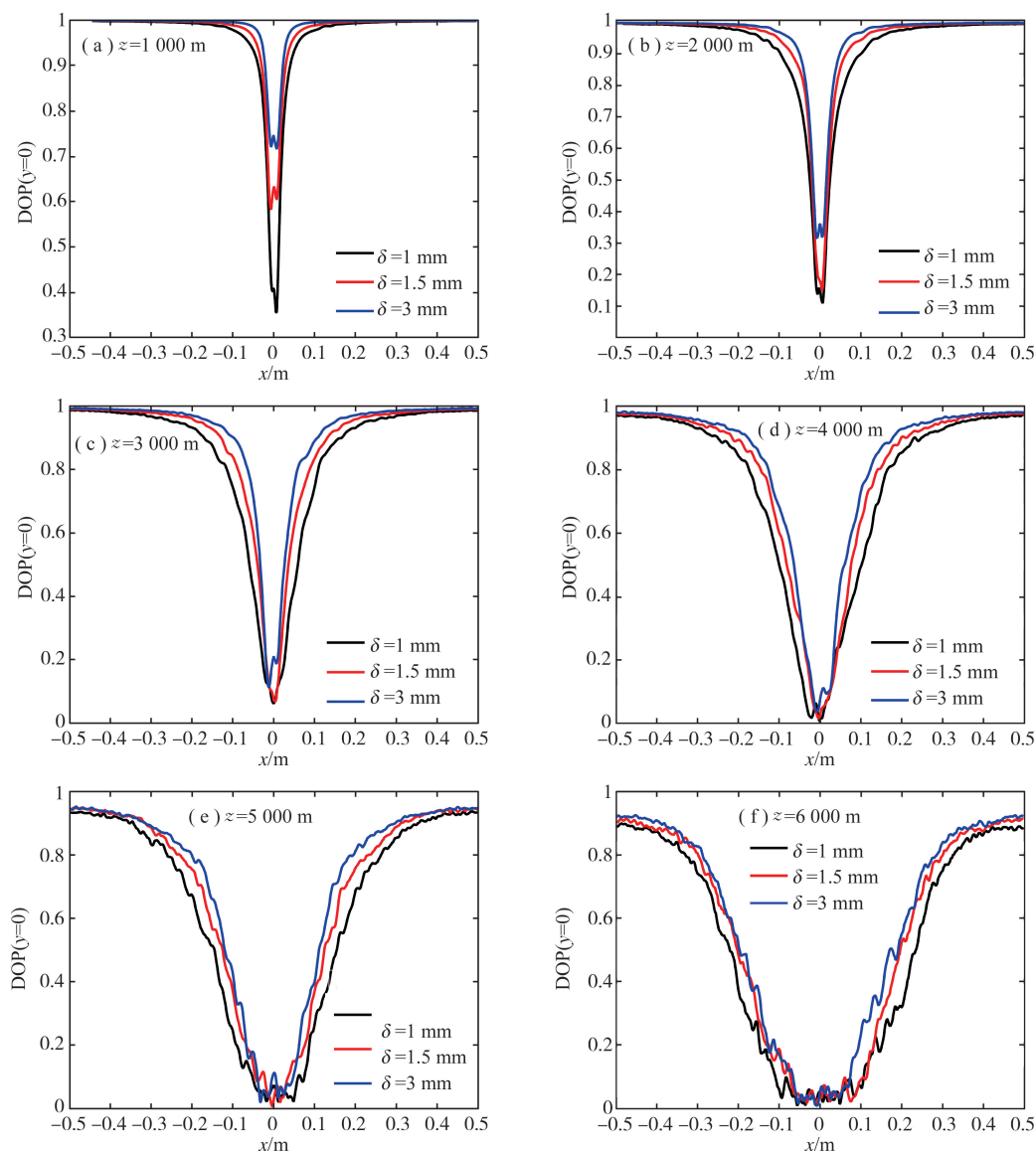


图 6 不同相干长度的部分相干径向偏振环形艾里涡旋光束在大气湍流中时的一维偏振度

Fig. 6 The cross line ($y=0$) of the degree of polarization $DOP(x, y, z)$ of PCRPRAVB with different coherence lengths at several propagation distance

3 结 论

本文利用复透射屏法构建了部分相干径向偏振环形艾里涡旋光束,基于分步相位屏法研究了部分相干径向偏振环形艾里涡旋光束在各项异性湍流中的传输特性。研究结果显示:随着传输距离的增大,光束旁瓣逐渐消失,轴上光强逐渐增大,最终涡旋光束退化成高斯状分布。相干长度越大,部分相干径向偏振环形艾里涡旋光束保持涡旋特性的能力就越强。随着相干长度、截断因子的减小,拓扑荷数的增大,闪烁指数减小。随着相干长度、拓扑荷数的增大,部分相干径向偏振环形艾里涡旋光束抵抗退偏的能力增强。这说明可以根据需求,选择相干性合适的部分相干径向偏振环形艾里涡旋光束作为激光光源,来提高抵抗大气湍流的不利

效应。

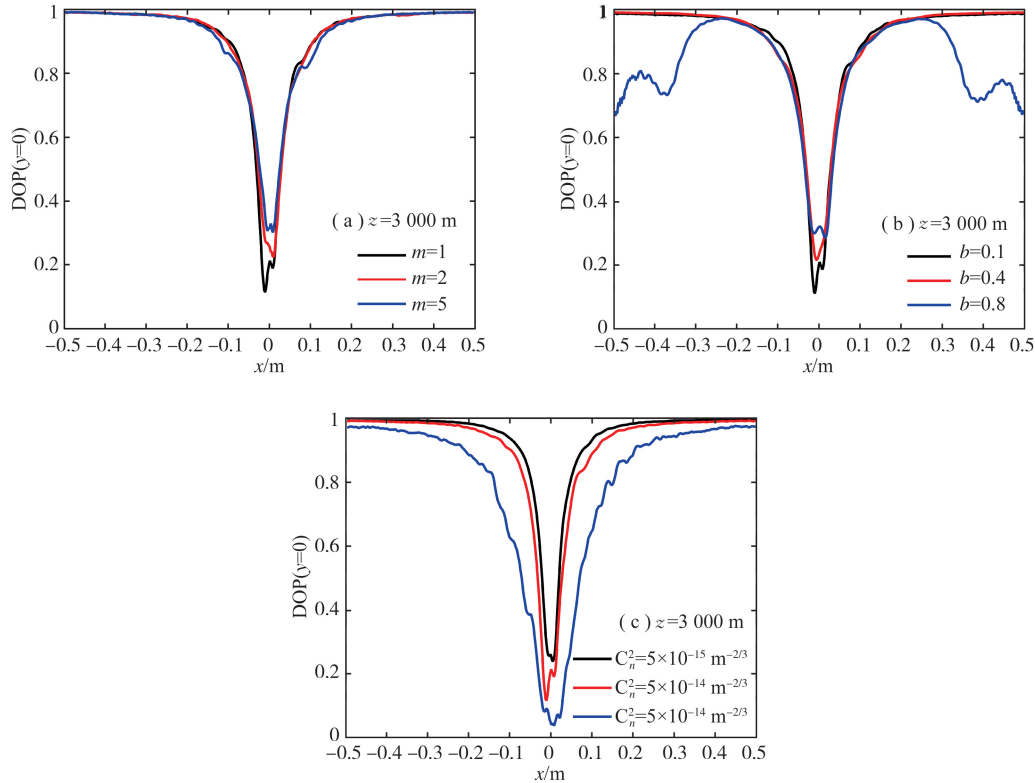


图 7 传输距离为 $z=3\ 000\ \text{m}$ 时,不同条件下的偏振度对比 (a) 拓扑荷数,(b) 截断因子,(c) 湍流强度

Fig. 7 The cross line ($y=0$) of the degree of polarization $DOP(x, y, z)$ of PCRPRAVB with different parameters when propagation distance is $3\ 000\ \text{m}$: (a) for topological charge; (b) truncation factor; (c) atmospheric turbulence strength

参 考 文 献

- [1] WANG J, YANG J Y, FAZAL I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing [J]. Nature Photonics, 2012, 6(7):488-496.
- [2] 张磊,陈子阳,熊梦苏,等. 部分相干光在大气湍流中传输的闪烁指数[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(9):77-81.
- [3] JI X Y, YIN H X, JING L Y, et al. Analysis of aperture averaging effect and communication system performance of wireless optical channels with from weak to strong turbulence in natural turbid water [J]. Optics Communications, 2023, 528: 129018.
- [4] LIU X Y, FANG J F, XIAO S L, et al. Probabilistically shaped polar-coded MIMO-FSO communication systems with spatially correlated fading [J]. Optics Express, 2022, 30(17): 30980-30990.
- [5] NAI R P, KRISHNAN P, SIMHA G G. Reconfigurable intelligent surface-assisted free-space optical communication system under the influence of signal blockage for smart-city applications [J]. Applied Optics, 2022, 61(20):5957-5964.
- [6] SIVILOGLOU G A, DOGARIU B A, CHRISTOULIDES. Observation of accelerating Airy beams [J]. Physical Review Letters, 2007, 99:213901.
- [7] BROKY J B, SIVILOGLOU G A, DOGARIU A, et al. Self-healing properties of optical Airy beams [J]. Optics Express, 2008, 16(17): 12880-12891.
- [8] EFREMIDIS N K, CHRISTODOULIDES D N. Abruptly autofocusing waves [J]. Optics Letters, 2010, 35(23):4045-4047.
- [9] EYYUBOGLU H T. Scintillation behavior of Airy beam [J]. Optics and Laser Technology, 2013, 47:232-236.
- [10] 李怡,楚兴春,唐翰林,等. 径向阵列艾里涡旋光在倾斜大气湍流中的漂移特性[J]. 激光与红外, 2022, 52(10):1448-1455.
- [11] 李亚清,王利国,王谦. 湍流大气中环形 Airy 高斯涡旋光束的强度和相位特性[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(14): 19-26.
- [12] YONG K L, TANG S F, YANG X M, et al. Propagation characteristics of a ring Airy vortex beam in slant atmospheric turbulence [J]. Journal of Science of America B, 2021, 38(5):1510-1517.

(下转第 22 页)

- ing[C]. // The 8th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Suzhou, China, 2013: 252-255.
- [10] WU G, HOU S L, LEI J L, et al. Beam tailoring devices using transmission-type subwavelength grating[J]. *Photonics*, 2023, 10(6): 607.
- [11] DEVLIN R C, KHORASANINEJAD M, CHEN W T, et al. Broadband high-efficiency dielectric metasurfaces for the visible spectrum [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America Acad Sci*, 2016, 113(38): 10473-10478.
- [12] KHORASANINEJAD M, CHEN W T, DEVLIN R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and sub-wavelength resolution imaging[J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [13] LIANG Y Y, LIU H Z, WANG F Q, et al. High-efficiency, near-diffraction limited, dielectric metasurface lenses based on crystalline titanium dioxide at visible wavelengths[J]. *Nanomaterials (Basel)*, 2018, 8(5): 288.
- [14] HE S M, WANG Z H, LIU Q F. Positive focal shift of gallium nitride high contrast grating focusing reflectors[J]. *Materials Research Express*, 2016, 3(9): 095901.
- [15] LIU H, XU Z Q, GAO G Y, et al. Diffraction-limited imaging with monolayer 2D material-based ultrathin flat lenses[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 137.
- [16] ARBABI A, HORIE Y, BALL A J, et al. Subwavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmitarrays[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7069.
- [17] 刘逸天, 陈琦凯, 唐志远, 等. 超表面透镜的像差分析和成像技术研究[J]. *中国光学*, 2021, 14(4): 831-850.

(责任编辑:赵海军)

(上接第 15 页)

- [13] CHU X C, LIU R J, LI Y, et al. BER analysis of FSO system with Airy beam as carrier over exponentiated Weibull channel model [J]. *Optical and Quantum Electron*, 2021, 53: 692.
- [14] ZILBERMAN A, GOLBRAIKH E, KOPEIKA N S. Propagation of electromagnetic waves in Kolmogorov and non-Kolmogorov atmospheric turbulence: three-layer altitude model [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(34): 6385-6391.
- [15] ZHAO L A, XU Y D, DAN Y Q. Evolution properties of partially coherent radially polarized Laguerre-Gaussian vortex beams in an anisotropic turbulent atmosphere [J]. *Optics Express*, 2021, 29: 34986-35002.
- [16] YONG K L, TANG S F, YANG X M, et al. Propagation characteristics of a ring Airy vortex beam in slant atmospheric turbulence [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 38(5): 1510-1517.
- [17] GOLMOHAMMADY S, GHAFARY B. Generalized Stokes parameters and polarization behavior of flat-topped array laser beam propagating through oceanic turbulence [J]. *Waves in Random and Complex Media*, 2017, 27(3): 403-419.
- [18] QIU Y L, LIU J L, CHEN Z X. Propagation properties of radially polarized partially coherent LG(0,1)* beams [J]. *Optics Communications*, 2009, 282: 69-73.
- [19] Ricklin J, Davidson F. Atmospheric optical communication with a Gaussian Schell beam[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2003, 20(5): 856-866.

(责任编辑:赵海军)