

文章编号:1001-5078(2020)01-0009-04

· 激光应用技术 ·

部分相干异常涡旋光束在大气湍流中的传输特性

黎芳¹, 刘慧²

(1. 北京建筑大学理学院, 北京 102616; 2. 北京建筑大学电气与信息工程学院, 北京 102616)

摘要:研究了部分相干异常涡旋光束在湍流大气中传输时的光强特性和有效光斑尺寸。利用广义惠更斯-菲涅尔积分式推导了部分相干异常涡旋光束的互相干函数的表达式,并在此基础上得到部分相干异常涡旋光束的光强和有效光斑尺寸的表达式。通过数值模拟分析了部分相干异常涡旋光束的归一化光强分布和有效光斑尺寸随空间相干长度和折射率常数的变化情况。研究结果表明:部分相干异常涡旋光束比完全相干异常涡旋光束受大气湍流的影响更小。而且随着空间相干长度的减小和大气折射率常数的增加,异常涡旋光束光强的中心点强度和有效光斑尺寸逐渐增加。

关键词:异常涡旋光束;部分相干;大气湍流;光强;有效光斑尺寸

中图分类号: O436.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2020.01.002

Propagation of partially coherent anomalous vortex beams through turbulent atmosphere

LI Fang¹, LIU Hui²

(1. School of Science, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China)

Abstract: The intensity and effective beam width of the partially coherent anomalous vortex beams propagating through turbulent atmosphere are investigated in the paper. Based on the extended Huygens-Fresnel integral, the expressions for the intensity and effective beam width of the partially coherent anomalous vortex beam are derived. The propagation properties of the partially coherent anomalous vortex beams are studied via a set of numerical examples. Numerical results reveal that the intensity of the partially coherent anomalous vortex beam is less affected by the atmospheric turbulence than the fully coherent anomalous vortex beam. With the increasing of refractive index structure constant while the decreasing of correlation length, the central intensity and effective beam width of anomalous vortex beams increases gradually.

Keywords: anomalous vortex beam; partially coherent; atmospheric turbulence; intensity; effective beam width

1 引言

涡旋光束是近年来国际上研究的热点领域之一,已经在量子信息编码、空间信息传输与通信、遥

感成像、光学微操纵、生物医学等领域得到了广泛且重要的应用^[1-6]。常见的涡旋光束有拉盖尔-高斯光束和复宗量拉盖尔-高斯光束等。虽然复宗量拉

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41801229); 北京市教育委员会科技计划一般项目 (No. KM20181001600117; No. KM201710016008) 资助。

作者简介: 黎芳 (1984 -), 女, 讲师, 主要研究方向为涡旋光束的传输及在通信遥感的应用。E-mail: lifang@bucea.edu.cn

收稿日期: 2019-06-04; **修订日期:** 2019-06-25

盖尔-高斯光束的对称性比拉盖尔-高斯光束好,却没有得到较大的应用和发展,其中一个原因是其不容易产生。2013年,异常涡旋光束(Anomalous Vortex Beam, AVB)的首次提出且实验产生^[7]可以解决上述问题,这种涡旋光束在远场传输后可以变成复宗量拉盖尔-高斯光束,即 AVB 可以作为产生复宗量拉盖尔-高斯光束甚至更进一步产生贝塞尔-高斯光束、贝塞尔涡旋光束的光源。

AVB 在被提出之后也得到较多关注和研究^[8-12],这些研究主要针对的是完全相干 AVB。而在实际光学系统中,激光器发出的光束几乎都是部分相干光,而且在有些领域部分相干光比完全相干光得到更多的应用^[13],因此针对涡旋光束,越来越多的研究者聚焦于部分相干涡旋光束^[13-16],而且已经发现与完全相关光相比,部分相干拉盖尔-高斯光束和复宗量拉盖尔-高斯光束受大气湍流的影响较小^[17-18],因此在空间传输时更具有优势。而部分相干 AVB 在大气湍流中的传输特性还未见相关研究。因此本文将研究部分相干 AVB 在大气湍流中的传输特性。

光束在传输过程中的特性变化包括抖动、衰减、色散、展宽等^[19],而当涡旋光束在大气中传输时,其传输特性变化的主要是光强、相位起伏,光束展宽,螺旋谱弥散等。本文主要研究部分相干 AVB 的光强和有效光斑尺寸,先从源平面的 AVB 表达式出发,推导部分相干 AVB 在大气湍流中传输时的光强表达式,并在此基础之上研究有效光斑尺寸。

2 理论推导

假设光源位于 $z=0$ 平面, AVB 在源平面的光场表达式为^[7]:

$$E_{mn}(r, \theta, 0) = A \exp \left[- \left(\frac{r}{w_0} \right)^2 \right] \left[\frac{r}{w_0} \right]^{2n+|m|} \exp(-im\theta) \quad (1)$$

其中, A 为常数; n 为 AVB 的阶数; m 为拓扑荷; w_0 为束腰半径。

则 AVB 在源平面的互相干函数为:

$$W_0(r_1, \theta_1, r_2, \theta_2; 0) = A^2 \exp \left[- \frac{r_1^2 + r_2^2}{w_0^2} \right] \left[\frac{r_1 r_2}{w_0^2} \right]^{2n+|m|} \times \exp[-im(\theta_1 - \theta_2)] \exp \left[- \frac{(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (2)$$

其中, σ 为空间相干长度。

根据广义惠更斯-菲涅尔公式可得 AVB 沿 z 轴正方向在湍流大气中传输时, z 平面的互相干函数为:

$$W(\rho_1, \varphi_1, \rho_2, \varphi_2; z) = \left(\frac{1}{\lambda z} \right)^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty W_0 \times \exp \left\{ - \frac{ik(\vec{r}_1 - \vec{\rho}_1)^2}{2z} + \frac{ik(\vec{r}_2 - \vec{\rho}_2)^2}{2z} \right\} \times \langle \exp[\psi(\vec{r}_1, \vec{\rho}_1, z) + \psi^*(\vec{r}_2, \vec{\rho}_2, z)] \rangle r_1 r_2 dr_1 d\theta_1 dr_2 d\theta_2 \quad (3)$$

其中, λ 为波长; k 为波数。再根据利托夫(Rytov)相位结构函数的平方近似可得:

$$\langle \exp[\psi(\vec{r}_1, \vec{\rho}_1, z) + \psi^*(\vec{r}_2, \vec{\rho}_2, z)] \rangle = \exp \left[- \frac{(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)^2 + (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)(\vec{\rho}_1 - \vec{\rho}_2) + (\vec{\rho}_1 - \vec{\rho}_2)^2}{\rho_0^2} \right] \quad (4)$$

式中, $\rho_0^2 = (0.545 C_n^2 k^2 z)^{-3/5}$ ^[13,16]; C_n^2 为折射率结构常数。

将式(2)和式(4)代入式(3),并取 $\vec{\rho}_1 = \vec{\rho}_2$, 经过繁琐的积分计算,可得到部分相干 AVB 在大气湍流中传输时的光强表达式:

$$I = W(\rho_1, \varphi_1, \rho_1, \varphi_1; z) = \left(\frac{Ak}{z} \right)^2 \sum_{l=-\infty}^{\infty} \int_0^\infty \int_0^\infty \left[\frac{r_1 r_2}{w_0^2} \right]^{2n+|m|} \cdot \exp \left[- \left(\frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{2\sigma^2} + \frac{1}{\rho_0^2} + \frac{ik}{2z} \right) r_1^2 \right] \cdot \exp \left[- \left(\frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{2\sigma^2} + \frac{1}{\rho_0^2} - \frac{ik}{2z} \right) r_2^2 \right] \cdot J_l \left(\frac{kr_1 \rho_1}{z} \right) J_l \left(\frac{kr_2 \rho_1}{z} \right) I_{\zeta_{m+l}} \left(\frac{2r_1 r_2}{2\sigma^2} + \frac{2r_1 r_2}{\rho_0^2} \right) r_1 r_2 dr_1 dr_2 \quad (5)$$

基于上述光强表达式(5),可以得到部分相干 AVB 的有效光斑尺寸。根据部分相干光束在 x 方向和 y 方向的有效光斑尺寸的定义:

$$w_z^2 \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{4 \iint \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}^2 I dx dy}{\iint I dx dy} \quad (6)$$

可将其转成极坐标系,并得部分相干 AVB 的有效光斑尺寸为:

$$w_z^2 = \frac{4 \iint \rho^2 I \rho d\rho d\varphi}{\iint I \rho d\rho d\varphi} \quad (7)$$

3 数值仿真

基于光强表达式(5)和有效光斑尺寸表达式(7)进行数值模拟,以得到部分相干 AVB 的光强分布,以及空间相干长度 σ 和大气折射率常数 C_n^2 对光强和有效光斑尺寸的影响,从而在实际应用中能找到上述两参数的相对合适的取值。参数取值为 $A=1$, $\lambda=632.8\text{ nm}$, $m=n=1$, $w_0=2\text{ mm}$, $z=5z_0=5\frac{kw_0^2}{2}$ 。图 1 所示为当大气折射率常数 C_n^2 分别为 0 和 $10^{-12}\text{ m}^{-2/3}$ 时,AVB 的归一化强度分布随空间相干长度 σ 的变化情况。由图 1(a)可知当完全相干($\sigma=\infty$) AVB 在自由空间($C_n^2=0$)和大气湍流($C_n^2=10^{-12}\text{ m}^{-2/3}$)中传输时,光强分布呈圆环结构,而随着 σ 的减小,光强的中心点强度逐渐增强,光束逐渐展宽。由图 1(a)和图 1(b)对比可知, C_n^2 的增加也会引起光束的中心强度增强和展宽。

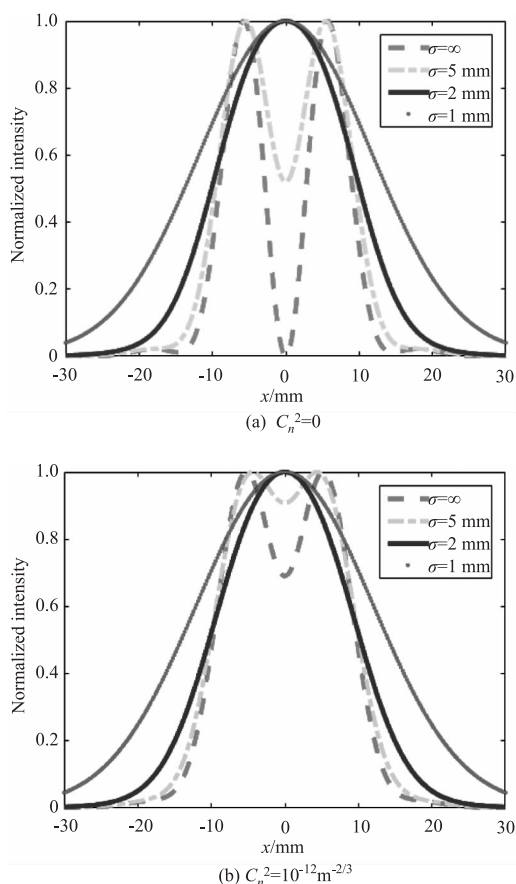


图 1 AVB 的归一化强度分布随空间相干长度 σ 的变化情况

Fig. 1 The normalized intensity distribution of AVB varies with the spatial coherence length σ

图 2 所示为当 σ 分别为 ∞ 和 2 mm 时,AVB 的归一化强度分布随 C_n^2 的变化情况。由图 2(a)和图 2(b)对比可以发现,当 AVB 为完全相干光($\sigma =$

∞)时, C_n^2 取值不同,光强分布表现出较大的差异。而当 AVB 为部分相干光($\sigma=2\text{ mm}$)时,光强分布在不同 C_n^2 时几乎一致。由此验证了部分相干涡旋光束受大气湍流的影响比完全相干涡旋光束小。

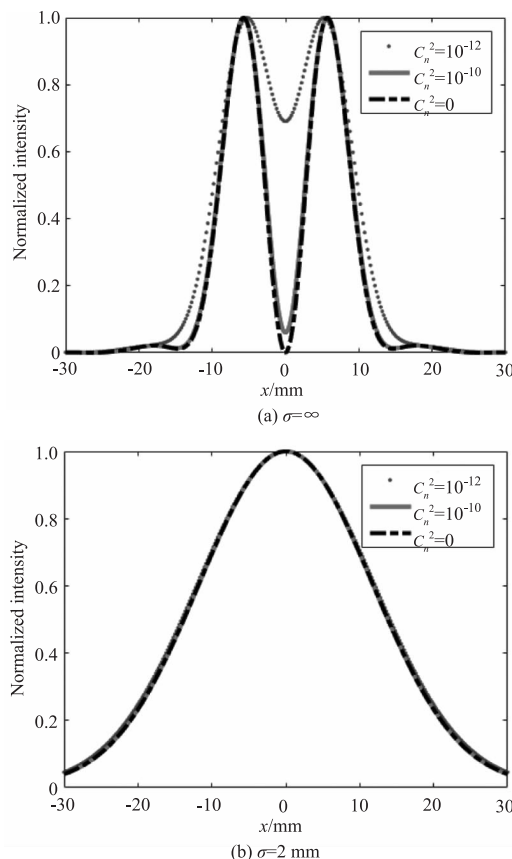


图 2 AVB 的归一化强度分布随 C_n^2 的变化情况

Fig. 2 The normalized intensity distribution of AVB varies with C_n^2

图 3 为部分相干 AVB 的有效光斑尺寸随 σ 和 C_n^2 的变化情况。由图可知随着传输距离的增加,光束逐渐展宽。而且 σ 越小和 C_n^2 越大,有效光斑尺寸越大,这与图 1 所示结果一致。

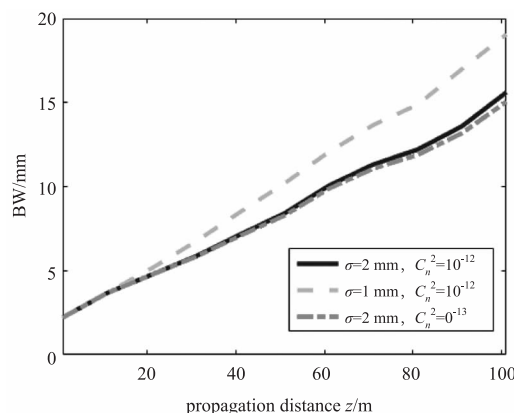


图 3 部分相干 AVB 的有效光斑尺寸

Fig. 3 Effective spot size of partially coherent AVB

4 结 论

本文研究了部分相干 AVB 在湍流大气中的光强特性和有效光斑尺寸。研究表明:部分相干 AVB 比完全相干 AVB 受大气湍流的影响更小。而且随着空间相干长度的减小和大气折射率结构常数的增加,AVB 光强的中心点强度逐渐增强,且有效光斑尺寸更大。上述研究成果对于 AVB 在通信和遥感领域的应用具有指导作用。

参考文献:

- [1] Therese Anita G, Umamageswari N, Prabakaran K, et al. Effect of coma on tightly focused cylindrically polarized vortex beams[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 76: 1 – 5.
- [2] Willner AE, Huang H, Yan Y, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(1): 66 – 106.
- [3] Molina-Terriza G, Rebane L, Torres J, et al. Probing canonical geometrical objects by digital spiral imaging[J]. Journal of European Optical Society Rapid Publications, 2007, 2(3): 873.
- [4] Gibson G, Courtial J, Padgett MJ, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum [J]. Optics Express, 2004, 12 (22): 5448 – 5456.
- [5] O'Neil A, Padgett M. Axial and lateral trapping efficiency of Laguerre-Gaussian modes in inverted optical tweezers [J]. Optics Communications, 2001, 193(1 – 6): 45 – 50.
- [6] WEI Yong. Propagation characteristic analysis of vortex beams produced by spiral phase plate[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(7): 857 – 861. (in Chinese)
魏勇. 利用螺旋相位板获取涡旋光束的传播分析[J]. 激光与红外, 2016, 46(7): 857 – 861.
- [7] Yuanjie Y, Yuan D, Chengliang Z, et al. Generation and propagation of an anomalous vortex beam[J]. Optics Letters, 2013, 38(24): 5418 – 5421.
- [8] Zhang M, Yang Y. Tight focusing properties of anomalous vortex beams[J]. Optik, 2018, 154: 133 – 138.
- [9] Li F, Ou J, Chen R, et al. Propagation of anomalous vortex beams beyond the paraxial approximation [J]. Optik, 2018, 174: 99 – 105.
- [10] Yang Z F. Characteristics of off-waist incident anomalous vortex beams in highly nonlocal media [J]. Results in Physics, 2017, 7: 4337 – 4339.
- [11] Yang Z J, Yang Z F, Li J X, et al. Interaction between anomalous vortex beams in nonlocal media[J]. Results in Physics, 2017, 7: 1485 – 1486.
- [12] Li F. Intensity and orbital angular momentum density of nonparaxial anomalous vortex beams [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2017, 147: 240 – 247.
- [13] Xu YG, Li YD, Zhao XL. Intensity and effective beam width of partially coherent Laguerre-Gaussian beams through a turbulent atmosphere[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2015, 32(9): 1623 – 1630.
- [14] Xu YG, Li YD, Dan YQ, et al. Propagation based on second-order moments for partially coherent Laguerre-Gaussian beams through atmospheric turbulence[J]. Journal of Modern Optics, 2016, 63(12): 1121 – 1128.
- [15] Zhang YT, Liu L, Wang F, et al. Average intensity and spectral shifts of a partially coherent standard or elegant Laguerre-Gaussian beam beyond paraxial approximation [J]. Optical and Quantum Electronics, 2014, 46 (2): 365 – 379.
- [16] Wang H, Wang H, Xu Y, et al. Intensity and polarization properties of the partially coherent Laguerre-Gaussian vector beams with vortices propagating through turbulent atmosphere[J]. Optics and Laser Technology, 2014, 56: 1 – 6.
- [17] Wang F, Cai Y, Korotkova O. Partially coherent standard and elegant Laguerre-Gaussian beams of all orders [J]. Opt. Express, 2009, 17(25): 22366 – 22379.
- [18] Wang F, Cai Y, Eyyubolu HT, et al. Average intensity and spreading of partially coherent standard and elegant Laguerre-Gaussian beams in turbulent atmosphere [J]. Pier, 2010, 103(4): 33 – 56.
- [19] YU Jiping, QI Wenzong, GUO Chunfeng, et al. Numerical simulation of laser propagation through atmospheric turbulence[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(6): 523 – 527. (in Chinese)
于继平, 齐文宗, 郭春风, 等. 激光大气传输特性的数值模拟[J]. 激光与红外, 2008, 38(6): 523 – 527.