

doi:10.3788/gzxb20184712.1201002

贝塞尔高斯光束在各向异性湍流中的传输特性

孙日东¹, 郭立新¹, 程明建^{1,2}, 闫旭¹, 李江挺¹

(1 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

(2 国防科技大学 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

摘 要:采用随机相位屏仿真方法模拟了各向异性大气湍流及贝塞尔高斯涡旋光束在其中的强度分布、在轴闪烁指数和抖动效应,分析了各向异性湍流参数和波源参数对涡旋光束传输质量的影响.结果表明,在各向异性大气湍流中,贝塞尔高斯涡旋光束的强度分布随传输距离的变化情况与离轴距离有关,仅一级圆环处强度值单调递减,其余次级圆环处强度值均呈现先增后降的趋势.在近距离处,贝塞尔高斯涡旋光束的在轴闪烁指数随波形参数的增大而减小,随光束宽度的增大呈现先上升后下降再上升的趋势,该现象与贝塞尔高斯光束的光斑尺寸大小相关;其抖动效应随波形参数、拓扑荷数量、波长和束腰半径的增大而减弱.但在远距离处贝塞尔高斯涡旋光束的闪烁效应和抖动效应随波形参数的影响与近距离处相反,这与贝塞尔高斯光束的展宽突然增大的现象一致.贝塞尔高斯涡旋光束在各向异性湍流大气中的抖动效应小于在各向同性湍流大气中的情况,并且在远距离处大于拉盖尔高斯涡旋光束的抖动效应.

关键词:光学涡旋;大气湍流;随机多层相位屏;光束抖动;在轴闪烁指数

中图分类号:O439; P401

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)12-1201002-8

Propagation Characteristics of Bessel-Gaussian Beam in Anisotropic Atmosphere

SUN Ri-dong¹, GUO Li-xin¹, CHENG Ming-jian^{1,2}, YAN Xu¹, LI Jiang-ting¹

(1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: The multiple random phase screen simulation method is used to simulate the anisotropic turbulent atmosphere and Bessel-Gaussian beam in intensity distribution, the on-axis scintillation and beam wander. The effects of anisotropic turbulence parameters and wave source parameters on the propagation quality of Bessel-Gaussian beam are analyzed. The results show that the intensity distribution of Bessel-Gaussian beam in anisotropic turbulent atmosphere is related to the off-axis distance. Only the intensity value at the first ring decreases monotonously, while the intensity value at the other secondary rings increases first and then decreases. The on-axis scintillation index of the Bessel-Gaussian beam at close range decreases with the increase of the waveform parameter, and there is a trend of first rising, then falling and then rising with the increase of beam width. This phenomenon is related to the beam width of Bessel-Gaussian beam. The beam wander decreases with increases of the waveform parameter,

基金项目:脉冲激光国家重点实验室开放基金(No. SKL2016KF05),陕西省重点产业创新链(群)项目(No. 2017ZDCXL-GY-06-02),华为公司创新研究计划(No. HO2017050001AG),中央高校基本科研业务费专项资金(No. CJT150502)和西安电子科技大学研究生创新基金(No. 20108183448)资助

第一作者:孙日东(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为大气、海洋环境涡旋光通信. Email:RDSun_xidian@163.com

导师(通讯作者):郭立新(1968-),男,教授,博士,主要研究方向为复杂目标与地海环境电磁散射特性、随机介质中的电波传播特性等. Email:lxguo@xidian.edu.cn

收稿日期:2018-06-15; **录用日期:**2018-08-20

<http://www.photon.ac.cn>

the number of orbital angular momentum, the wavelength and the beam width. However, at a long distance, its on-axis scintillation index and beam wander effect are opposite to that of near distance, which is consistent with the sudden increase of the width of Bessel-Gaussian beam. The wander effect of Bessel-Gaussian beam in anisotropic turbulent atmosphere is significantly less than that in isotropic turbulence atmosphere, and the result even larger than Laguerre-Gaussian beam at long distance.

Key words: Optical vortex; Atmospheric turbulence; Multiple random phase screen; Beam wander; On-axis scintillation

OCIS Codes: 010.1290; 010.1300; 010.1330; 060.2605

0 引言

多层随机相位屏模拟方法具有易于程序实现、思路清晰等特点,相比较传统理论解析方法适用性更高,能快速验证和预测理论结果,可用于模拟激光大气湍流传输等方面的研究.1967年 MCGLAMERY B L^[1] 提出基于大气折射率起伏空间功率谱可以反演出相应的大气湍流相位分布.1976年 FLECK J A^[2] 开始采用“多层随机相位屏法”来模拟激光大气湍流传输特性.近些年,实验研究发现光学湍流在自由大气层中表现出了明显的各向异性特征,传统柯尔莫戈若夫湍流大气功率谱模型不再适用.TOSELLI I 等^[3] 在 2011 年提出了更加准确的各向异性湍流大气功率谱模型.CARLOS^[7] 等提出了基于空间光调制器在短波红外系统中进行光传播的大气湍流模拟结果,证明了利用相位屏模拟自由空间光通信系统的有效性.ITALO^[5] 等利用空间光调制器模拟了各向异性非柯尔莫哥诺夫湍流,得到高斯涡旋光束通过湍流后的场强图,发现实验得到的闪烁值与理论相一致.柯熙政^[6] 等通过理论研究了部分相干艾里光束在湍流大气中的光束扩展与漂移.

贝塞尔高斯涡旋光束(Bessel-Gaussian Beam, BGB)因具有无衍射特性而备受研究者关注.在自由空间激光通信、光学成像、微操控等领域有广泛的应用前景.贝塞尔高斯涡旋光束在湍流大气中的传输机理研究是拓展其应用范围的基础.在各向同性湍流大气中,贝塞尔高斯涡旋光束的强度分布^[7]、光强闪烁^[8]、光束抖动^[9] 等已被理论推导得到.程明建^[10] 等分析了贝塞尔高斯涡旋光束在各向异性湍流中传输时轨道角动量的串扰问题,并且发现自由大气层相比较大气边界层更适合作为基于涡旋光束轨道角动量模态的光通信技术的应用场景.XU Ying^[11] 等对贝塞尔高斯涡旋光束在海洋和大气湍流中轨道角动量模式的串扰概率进行了研究,分析了不同湍流及波源参数下的串扰概率.PENG Juan^[17] 等研究了基于轨道角动量的部分相干贝塞尔高斯涡旋光束的在自由空间光通信系统在各向异性湍流中的信道容量问题,分析了信道容量的影响因素.

本文基于功率谱反演方法得到各向异性大气湍流相位屏,模拟了贝塞尔高斯涡旋光束在其中的光强分布、光强闪烁和光束抖动的影响,并与已有在轴闪烁的理论值进行比较.研究了不同参数下强度分布、闪烁效应和抖动效应的变化规律.

1 基本原理

1.1 贝塞尔高斯涡旋光束场强

在柱坐标系下,贝塞尔高斯涡旋光束在发射平面即源处的场强满足^[10]

$$U_0(r, \theta, 0) = \exp(-kr^2w) \exp(-i\theta) J_l(\Omega r) \quad (1)$$

式中, r 和 θ 分别表示极坐标中的径向参数和角向参数; $k = 2\pi/\lambda$ 表示激光波数, λ 为激光波长, $w = 1/kw_0^2 + i/F$, w_0 表示输入激光高斯束腰半径, F 为高斯聚焦参数; $J_l(\Omega r)$ 表示第一类贝塞尔函数; l 为轨道角动量(拓扑荷)数, $\Omega = p/w_0$ 为宽度参数, p 为贝塞尔高斯涡旋光束的波形参数.

已知在没有湍流的情况下,距离出射平面 L 处的场强可以通过 Huygens-Fresnel 积分得到输出场强表达式.在真空中传输 L 距离后的场强 $U_L(r, \theta, L)$ 表示为^[15]

$$U_L(r, \theta, L) = \frac{-1}{1+2i\omega L} \exp \left[i(kL - l\theta) - \frac{i\Omega^2 L + 2\omega k^2 r^2}{2k(1+2i\omega L)} \right] I_l \left(\frac{i\Omega r_0}{1+2i\omega L} \right) \quad (2)$$

式中, $I_l \left(\frac{i\Omega r_0}{1+2i\omega L} \right)$ 表示第一类修正贝塞尔函数.贝塞尔高斯涡旋光束的在轴闪烁指数的公式为^[16]

$$\begin{aligned}
 \sigma^2(r, \theta, L) = & 4\pi k^2 \int_0^L d\eta \int_0^\infty \kappa d\kappa \int_0^{2\pi} \Phi_n(\kappa) \operatorname{Re} \left\{ \left[I_l \left(\frac{\Omega r}{1 + 2i\omega L} \right) I_l \left(\frac{\Omega r}{1 - 2i\omega^* L} \right) \right]^{-1} \cdot \right. \\
 & \exp \left\{ \frac{2\omega_r \kappa (L - \eta) [2kr_0 \cos(\phi - \theta) - \kappa(L - \eta)]}{k(1 - 4\omega_i L + 4|\omega|^2 L^2)} \right\} \cdot \\
 & J_l \left\{ \frac{\Omega [\kappa^2 (L - \eta)^2 - 2k\kappa r (L - \eta) \cos(\phi - \theta) + k^2 r^2]^{1/2}}{k(1 + 2i\omega L)} \right\} \cdot \\
 & J_l \left\{ \frac{\Omega [\kappa^2 (L - \eta)^2 - 2k\kappa r (L - \eta) \cos(\phi - \theta) + k^2 r^2]^{1/2}}{k(1 - 2i\omega^* L)} \right\} - \\
 & \left. \left\{ \frac{\kappa^4 (L - \eta)^4 \exp(-4i\phi) - 2k^2 \kappa^2 r^2 (L - \eta)^2 \exp[-2i(\phi - \theta)] + k^4 r^4 \exp(-4i\theta)}{\kappa^4 (L - \eta)^4 - 2k^2 \kappa^2 r^2 (L - \eta)^2 \cos[2(\phi - \theta)] + k^4 r^4} \right\}^{0.5l} \cdot \right. \\
 & \exp(2ip\theta) \left[I_l \left(\frac{\Omega r}{1 + 2i\omega L} \right) \right]^{-2} \times \exp \left[-\frac{i\kappa^2 (1 + 2i\omega\eta) (L - \eta)}{k(1 + 2i\omega L)} \right] \cdot \\
 & J_l \left\{ \frac{\Omega [\kappa^2 (L - \eta)^2 - 2k\kappa r (L - \eta) \cos(\phi - \theta) + k^2 r^2]^{1/2}}{k(1 + 2i\omega L)} \right\} \cdot \\
 & \left. J_l \left\{ \frac{\Omega [\kappa^2 (L - \eta)^2 + 2k\kappa r (L - \eta) \cos(\phi - \theta) + k^2 r^2]^{1/2}}{k(1 + 2i\omega L)} \right\} \right\} d\phi
 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\Phi_n(\kappa)$ 表示湍流空间功率谱, η 表示传输距离从 0 积分到 L , κ 表示极坐标下的二维空间频率, ϕ 表示 κ 所处极坐标的角向参数, ω_i 表示束腰半径 ω 的虚数部分。

根据式(2)可得贝塞尔高斯涡旋光束的强度公式为^[15]

$$I_r(r, \theta, L) = U_L(r, \theta, L) U_L^*(r, \theta, L) \quad (4)$$

涡旋光束在大气中传输,受大气湍流效应的影响会产生抖动效应,其离散化的光束质心表达式为

$$x_c = \frac{\sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} x_i I(x_i, y_i, z)}{\sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} I(x_i, y_i, z)} \quad (5)$$

$$y_c = \frac{\sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} y_i I(x_i, y_i, z)}{\sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} I(x_i, y_i, z)} \quad (6)$$

$$\Delta\rho = \sqrt{x_c^2 + y_c^2} \quad (7)$$

其中 x_c 和 y_c 是光束质心的坐标, $\Delta\rho$ 表示光束质心离传输轴心的距离,即光束抖动。

1.2 随机多层相位屏仿真方法

基于快速傅里叶变换的大气湍流功率谱反演方法的基本思想是利用大气湍流折射率起伏空间功率谱对一个复高斯随机矩阵进行滤波,然后再利用快速傅里叶变换,得到大气湍流效应带来的复相位扰动。其中,相位功率谱 $\Phi_\phi(\kappa_x, \kappa_y, z)$ 与折射率谱 $\Phi_n(\kappa_x, \kappa_y, z)$ 之间的关系为^[12]

$$\Phi_\phi(\kappa_x, \kappa_y, z) = 2\pi k^2 \Delta z \Phi_n(\kappa_x, \kappa_y, z) \quad (8)$$

式中, Δz 表示每层相位屏之间的距离,并且需要满足 $L_0 < \Delta z < l_0^2/\lambda$, l_0 和 L_0 分别为大气湍流内尺度和外尺度。

应用一组复高斯随机数 a_R 对相位功率谱进行滤波,可以得到相空间内的二维频域复随机相位场为^[13]

$$\tilde{\phi}(\kappa_x, \kappa_y) = a_R \sqrt{\Phi_\phi(\kappa_x, \kappa_y, z)} \quad (9)$$

式中, $a_R = A_R + iB_R$, A_R 和 B_R 是实部和虚部均值皆为 0、方差为 1 的高斯随机数。

对二维频域复随机相位场进行傅里叶逆变换可以得到一个二维空间复随机相位场 $\phi(x, y)$, 其离散形式表示为^[12]

$$\varphi(j\Delta x, l\Delta y) = \sum_{m=0}^{N_x} \sum_{n=0}^{N_y} a_R \sqrt{\Delta\kappa_x \Delta\kappa_y} \sqrt{\Phi_\phi(m\Delta\kappa_x, n\Delta\kappa_y)} \exp \left[2\pi i \left(\frac{jm}{N_x} + \frac{ln}{N_y} \right) \right] \quad (10)$$

式中, j 和 l 表示 $\varphi(j\Delta x, l\Delta y)$ 所形成二维矩阵的第 j 行第 l 列, $\Delta\kappa_x = 2\pi/D_x$ 和 $\Delta\kappa_y = 2\pi/D_y$ 分别为 x 方向和 y 方向频率间隔, $D_x = N_x \Delta x$ 和 $D_y = N_y \Delta y$ 分别为相位屏两个方向上的长度, N_x 和 N_y 分别为两个方

向上的网格数, Δx 和 Δy 分别为两个方向上的网格间距.

在自由大气中, 光学湍流呈现出明显的各向异性特征, 柯尔莫戈若夫湍流空间功率谱不再适用, 本文采用考虑大气湍流内、外尺度影响的各向异性湍流大气功率谱来产生随机多层相位屏模型. 考虑大气湍流内、外尺度影响的各向异性大气湍流空间功率谱为^[10]

$$\Phi_n(\kappa) = A(\alpha) \tilde{C}_n^2 \xi_x \xi_y \frac{\exp[-(\xi_x^2 \kappa_x^2 + \xi_y^2 \kappa_y^2 + \kappa_z^2)/\kappa_l^2]}{(\xi_x^2 \kappa_x^2 + \xi_y^2 \kappa_y^2 + \kappa_z^2 + \kappa_0^2)^{\alpha/2}} \quad (11)$$

式中, ξ_x 和 ξ_y 分别表示沿 x 和 y 方向上的湍流各向异性参数. 当 $\xi_x = \xi_y = 1$ 时, 式(11)演变为各向同性非柯尔莫戈若夫湍流大气空间功率谱, $\kappa_l = c(\alpha)/l_0$, $\kappa_0 = c(\alpha)/L_0$, 其中 l_0 和 L_0 分别为大气湍流内尺度和外尺度^[10].

$$A(\alpha) = \Gamma(\alpha - 1) \cos(\pi\alpha/2) / (4\pi^2) \quad (12)$$

$$c(\alpha) = \{A(\alpha) \Gamma[(5-\alpha)/2] 2\pi/3\}^{1/(\alpha-5)} \quad (13)$$

式中, $\Gamma(x)$ 表示 Gamma 函数, α 为非柯尔莫戈若夫湍流功率谱指数, 其范围为 $3 < \alpha < 4$, \tilde{C}_n^2 表示一般大气湍流折射率结构常数.

通过采用快速傅里叶变换, 可以得到涡旋光束在通过湍流大气随机多层相位屏之前, 在自由空间中传输的数学表达式, 即^[14]

$$U' = \text{IFFT} \left[\text{FFT}[U_0] \cdot \frac{i\Delta z(k - k_r^2)}{2k} \right] \quad (14)$$

式中, U_0 和 U' 分别表示在源处以及经过一次傅里叶变换后的场强分布, IFFT 和 FFT 分别表示逆傅里叶变换和傅里叶变换, Δz 为每层相位屏之间的间距, $k_r^2 = k_x^2 + k_y^2$ 表示空间波数. 在通过相位屏后, 涡旋光束相当于附加了一个相位, 其场强 U_1 公式为^[14]

$$U_1 = U' \exp[i\varphi(x, y)] \quad (15)$$

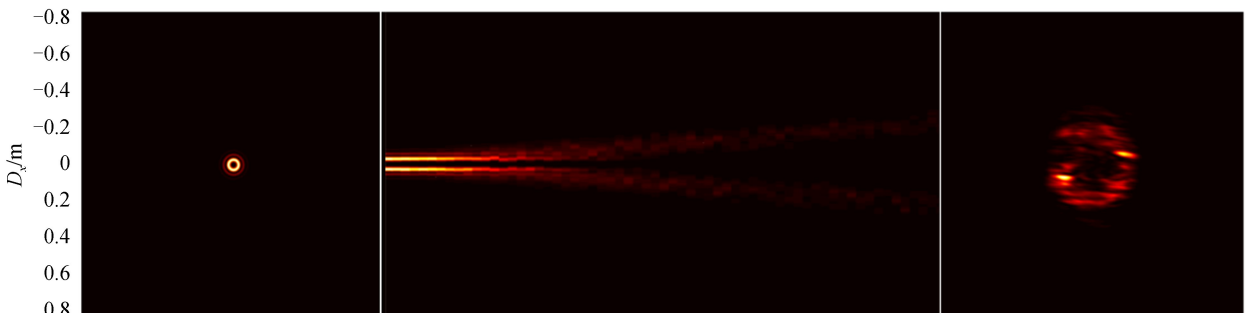
进行一次式(14)和(15)计算表示经过一层 Δz 厚度的相位屏传播. 如此经过反复迭代, 即可得到贝塞尔高斯涡旋光束通过该随机多层相位屏以后的场强和相位分布.

2 结果与讨论

基于随机多层相位屏仿真方法, 数值研究了贝塞尔高斯涡旋光束在各向异性湍流大气中的强度分布、在轴闪烁指数和质心抖动. 如没有特殊申明, 参数设置为: 贝塞尔高斯涡旋光束拓扑荷 $l=3$, 波形参数 $p=10$, 光束宽度 $w_0=0.07$ m, 波长 $\lambda=1\ 550$ nm, 传输距离 $L=2\ 500$ m, $C_n^2=10^{-14}$ m^{-2/3}, non-Kolmogorov 功率谱指数 $\alpha=11/3$, 湍流内尺度 $l_0=0.01$ m, 湍流外尺度 $L_0=10$ m, 湍流各向异性参数分别设置为 $\xi_x=5$, $\xi_y=1$. 相位屏尺寸 $D_x=D_y=1.706\ 5$ m, 网格数 $N_x=N_y=512$, 每层相位屏间距 $\Delta z=50$ m. 结果中每一个相位屏仿真得到的数据点均由 500 组数据统计取平均得到.

2.1 强度分布

图 1 描述了 $l=3$, $p=3$ 的贝塞尔高斯涡旋光束在源处和经过相位屏滤波后的强度和相位分布. 图 1(a)、(c) 分别表示贝塞尔高斯涡旋光束在源处和 5 000 m 处的强度分布, 图 1(b) 表示贝塞尔高斯涡旋光束在各向异性大气湍流中传播 5 000 m 的侧视图. 图 1(d)、(e) 分别表示沿 z 轴每层数据都进行归一化后贝塞尔高斯涡旋光束在湍流和真空环境中传播 5 000 m 的侧视图. 从图 1 中可以看出贝塞尔高斯涡旋光束在湍流中传播时强度分布发生明显起伏, 并且贝塞尔高斯涡旋光束的光束宽度会在传输一定距离后出现突然增大现象,



(a) BGB at the source

(b) BGB propagation side view in turbulence

(c) BGB at the distance $L=5000$ m

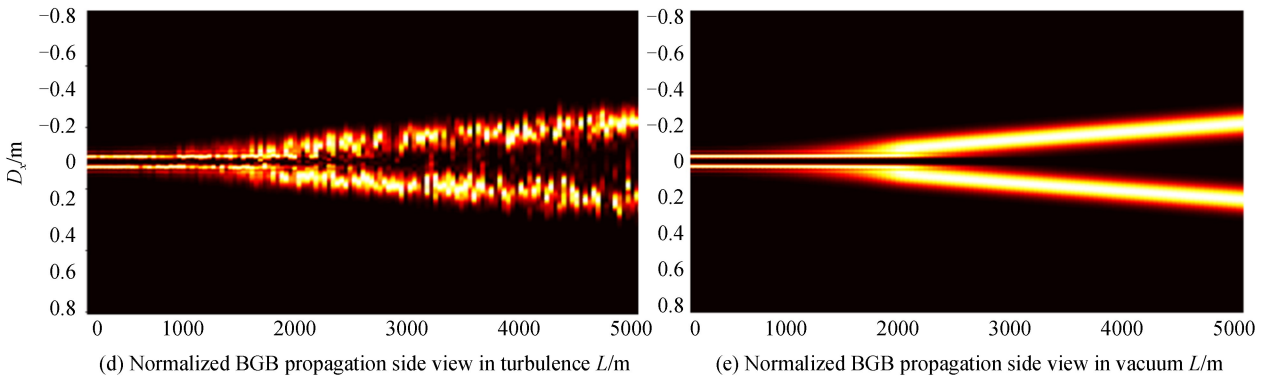


图1 贝塞尔高斯涡旋光源处、传输位置处及侧视的场强

Fig.1 Field intensity of Bessel-Gaussian beam at source, transmission position and lateral

这一现象在文献[18]中已有相关理论研究.这些现象必然导致光强闪烁、光束抖动,进而影响到贝塞尔高斯涡旋光束的传输质量.

图2为真空环境中不同离轴距离处贝塞尔高斯涡旋光束强度分布随传输距离的变化情况.其中4条点线分别表示相位屏仿真离轴 $r_0 = 0.033, 0.066, 0.099, 0.132$ m 处的强度分布情况,4条连续线分别表示理论计算离轴 $r_0 = 0.033, 0.066, 0.099, 0.132$ m 处的强度分布情况.由图可知只有一级圆环的强度值单调递减,其余次级环的强度值均呈现先增大后减小的规律.这一现象是因为在传输过程中贝塞尔高斯涡旋光束的强度值一直往外扩散造成的.因为一级圆环的强度值在接近 3 500 m 时已经趋近于 0,最亮环不再是一级圆环而可能是二级或三级圆环,所以造成了在 3 500 m 之后贝塞尔高斯涡旋光束的涡旋光束宽度急速扩大,也就出现图 1 中的现象.贝塞尔高斯涡旋光束这一强度分布特性使其在传输过程的闪烁效应和抖动效应有了不同于平面球面波的特征.

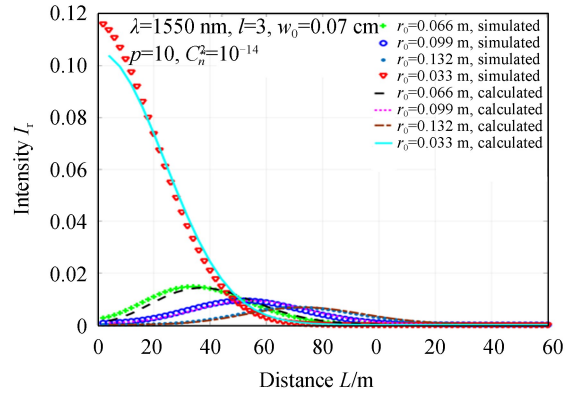


图2 真空环境中不同离轴距离处贝塞尔高斯涡旋光束强度分布随传输距离的变化情况

Fig.2 The variation of the Bessel-Gaussian beam intensity distribution with the propagation distance at different off-axis distances in a vacuum environment

2.2 在轴闪烁指数

将相位屏仿真的在轴闪烁指数结果与理论公式计算的在轴闪烁结果进行对比可得到图3所示结果,该

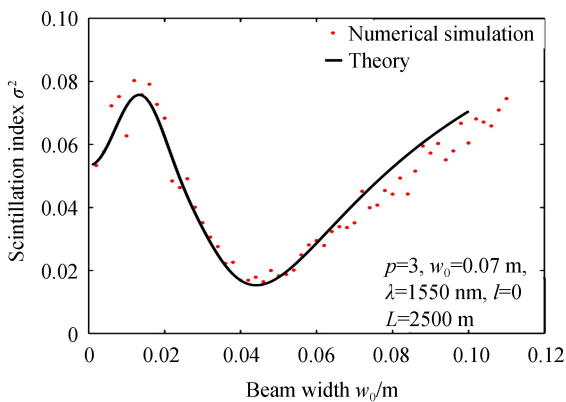


图3 贝塞尔高斯涡旋光束在轴闪烁指数随光束宽度的变化

Fig.3 The on-axis scintillation index of Bessel-Gaussian beam varies with the beam width

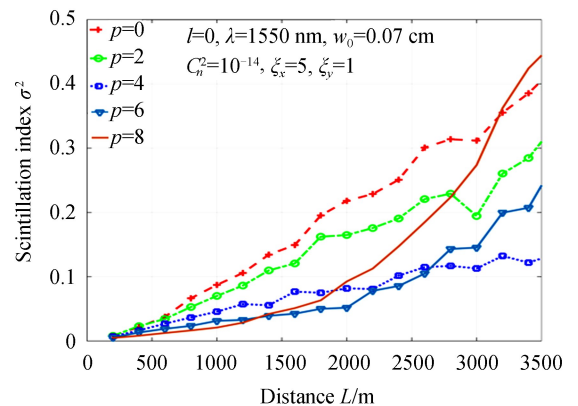


图4 不同波形参数下贝塞尔高斯涡旋光束的在轴闪烁指数随传输距离的变化

Fig.4 The on-axis scintillation index of Bessel-Gaussian beam varies with the propagation distance under different waveform parameters

理论结果与文献[15]相一致.图3为贝塞尔高斯涡旋光束在轴闪烁指数随光束宽度的变化情况,其中参数设置为 $l=0, p=3, \lambda=1\ 550\ \text{nm}, L=2\ 500\ \text{m}, C_n^2=10^{-15}\ \text{m}^{-2/3}, \xi_x=\xi_y=1$.从图3中可以得出贝塞尔高斯涡旋光束在轴闪烁指数相位屏仿真结果与理论计算结果相差无几,且随着光束宽度的增大,贝塞尔高斯涡旋光束的在轴闪烁指数变化呈现先增大后减小再增大的情况,其中 $w_0 \approx 0.012\ \text{m}$ 附近处的在轴闪烁指数呈现最大值, $w_0 \approx 0.044\ \text{m}$ 附近处闪烁指数呈现最低值.

图4研究了不同波形参数下贝塞尔高斯涡旋光束的在轴闪烁指数随传输距离的变化情况,其中波形参数分别为 $p=0, 2, 4, 6$ 和 8 .参数设置为 $l=0, w_0=0.07\ \text{m}, \lambda=1\ 550\ \text{nm}$.从图4中可以看出在较近距离处波形参数越大则在轴闪烁指数越小,但是在较远距离处波形参数 $p=6$ 和 8 的曲线有明显的上升趋势并反超波形参数较小的光束.这一反转现象与贝塞尔高斯涡旋光束的展宽变化一致,与文献[15]的理论结果一致.

2.3 质心抖动

图5显示了波形参数 p 对贝塞尔高斯涡旋光束在各向异性湍流大气中光束抖动效应影响的规律.此时,拓扑荷数 $l=1$,波形参数分别为 $p=4, 7, 10$ 和 20 .从图5中明显看到随着传输距离的增加,贝塞尔高斯涡旋光束的抖动效应逐渐增强.贝塞尔高斯涡旋光束在传输距离较短时抖动随着波形参数 p 的增大而增大,但是到达较大的传输距离后结果刚好相反.在短距离出现这一情况是因为随着波形参数的增大,贝塞尔高斯涡旋光束出现多环结构,并且中心亮环的半径变小,因此抖动更加剧烈.而传输到一定距离后贝塞尔高斯涡旋光束的展宽出现突然增大现象,且波形参数较大的光束展宽增大得更快,因此在远距离出现了相反结果,这一现象可以通过图1(b)和图5(b)得到解释.图5(b)表示贝塞尔高斯涡旋光束的展宽随着传输距离的变化情况.发现较大波形参数的涡旋光束虽然在近距离展宽较小,但是展宽增加幅度明显大于较小波形参数的涡旋光束.

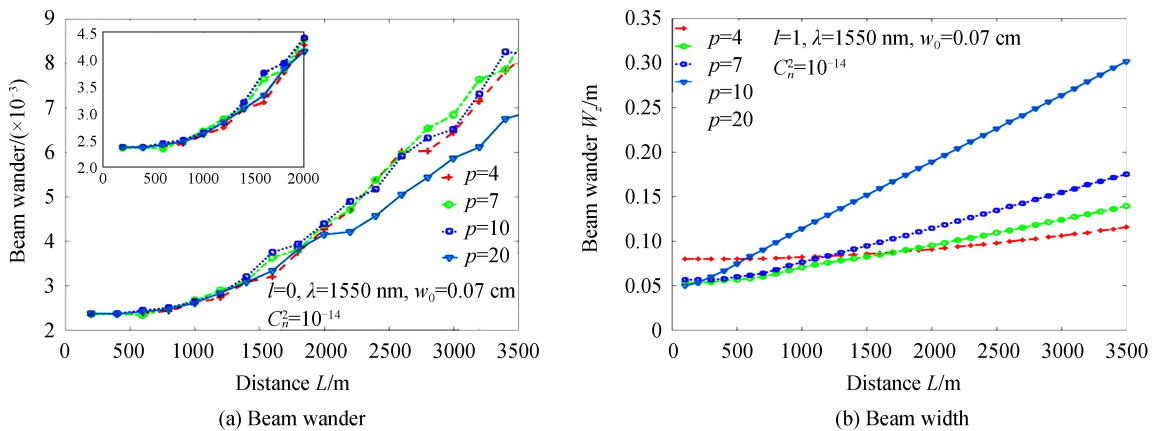


图5 不同波形参数的贝塞尔高斯涡旋光束随传输距离抖动和展宽变化情况

Fig.5 The beam wander and beam width of Bessel-Gaussian beam varies with the propagation distance under different waveform parameters

图6统计了贝塞尔高斯涡旋光束的光束抖动在不同各向异性的湍流大气中随传输距离的变化情况,其中各向异性参数设置分别为 $\xi_x=1, 5, 10$ 和 20 .从图6中可以发现随着湍流各向异性参数的增大,贝塞尔高斯涡旋光束的抖动效应逐渐减弱,在远距离传输时,该现象更加明显.随着湍流各向异性参数的减小,贝塞尔高斯涡旋光束的抖动效应增强,当各向异性参数都为1时抖动效应最强,此时大气湍流谱退化为各向同性湍流谱.这是因为各向同性大气模拟的是近地大气湍流,各向异性大气模拟的是高空大气湍流,其高空大气湍流对涡旋光束相位强度的扰动要弱于近地大气湍流的扰动,因此导致了抖动效应随各向异性参数的增大而减弱.

图7比较了携带不同拓扑荷数($l=0, 2, 4$ 和 6)的贝塞尔高斯涡旋光束(图7(a))和单环拉盖尔高斯涡旋涡旋光束(Laguerre-Gaussian beam, LGB)(图7(b))在各向异性湍流大气中光束抖动效应的差异.湍流大气中涡旋光束的光束抖动效应明显弱于非涡旋光束($l=0$),且光束抖动效应随着拓扑荷数的增大而减小.这是因为随着拓扑荷数的增大,涡旋光束的光束宽度随之增大,光斑尺寸的增大导致了其抖动效应随之减弱.比较图7(a)和图7(b),发现相同情况下贝塞尔高斯涡旋光束的抖动效应在远距离处要高于拉盖尔高斯涡旋光束.

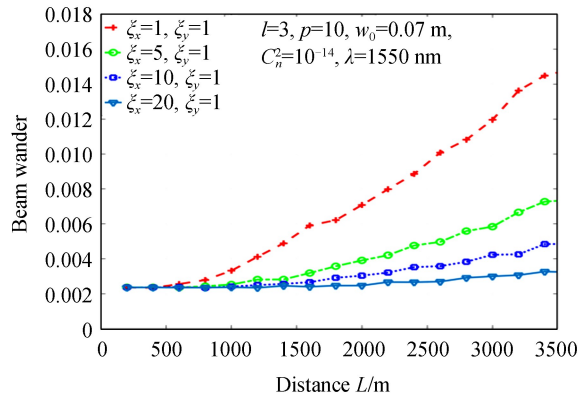
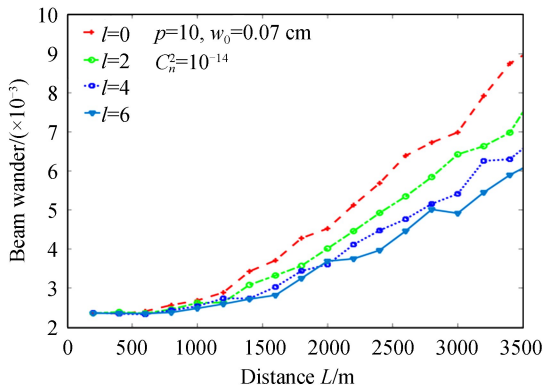
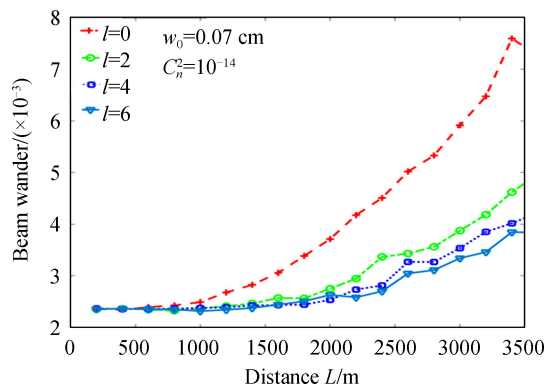


图 6 贝塞尔高斯涡旋光束的光束抖动在不同各向异性参数下随传输距离的变化

Fig.6 The beam wander of Bessel-Gaussian beam varies with the propagation distance under different anisotropic parameters



(a) Bessel-Gaussian beam



(b) Laguerre-Gaussian beam

图 7 贝塞尔高斯涡旋光束和拉盖尔高斯涡旋光束的光束抖动在不同拓扑荷数下随传输距离的变化情况

Fig.7 The beam wander of Bessel-Gaussian beam and Laguerre-Gaussian beam varies with the propagation distance under different orbital angular momentum number

3 结论

运用大气湍流功率谱反演方法,产生了各向异性湍流大气随机多层相位屏.数值研究了贝塞尔高斯涡旋光束在各向异性湍流大气中的强度分布、在轴闪烁指数和光束抖动情况.结果表明贝塞尔高斯涡旋光束在各向异性湍流大气中的强度分布随传输距离的变化呈现非线性变化,除一级圆环单调递减外,其余次级圆环的强度值均呈现先增大后减小趋势.贝塞尔高斯涡旋光束的在轴闪烁指数随波形参数 p 的增大而减小,但在较远距离处结果相反,这一结果与贝塞尔高斯涡旋光束的展宽扩展一致.贝塞尔高斯涡旋光束在轴闪烁指数随着光束宽度的增大呈现先增大后减小再增大的情况,这一现象应是由该距离处不同光束宽度的涡旋光束的中心强度下降速度不同造成.在远距离处波形参数 p 较大的贝塞尔高斯涡旋光束的光束抖动更小,而在近距离处则结果相反,这与贝塞尔高斯涡旋光束在传输过程中的光束展宽有关.随着拓扑荷数 l 的增加,贝塞尔高斯涡旋光束的光束抖动效应减弱.在传输到较远距离后,贝塞尔高斯涡旋光束的抖动效应将大于相同拓扑荷数的单环拉盖尔高斯涡旋光束.贝塞尔高斯涡旋光束在各向异性大气湍流中的光束抖动明显小于各向同性大气湍流中的抖动情况,且受各向异性参数影响十分明显,各向异性参数越大则光束抖动越弱.这一研究证明了贝塞尔高斯涡旋光束在通信传输过程中需要根据不同的传输距离选择不同参数得到最优传输质量,对于涡旋光束在大气湍流中的通信传输有较大的作用,可为后续的研究提供参考.

参考文献

- [1] MCGLAMERY B L. Restoration of turbulence-degraded images[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57(3): 293-297.
- [2] FLECK J A, MORRIS J R, FEIT M D. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere [J]. *Applied Physics*, 1976, 10 (2): 129-160.

- [3] TOSELLI I, AGRAWAL B, RESTAINO S. Light propagation through anisotropic turbulence[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, **28**(3): 483-488.
- [4] FONT C, SANTIAGO F, GILBREATH G C, *et al.* Implementation of a phase only spatial light modulator as an atmospheric turbulence simulator at 1550 nm[J]. *Advances in Optical Technologies*, 2014, 2014.
- [5] TOSELLI I, KOROTKOVA O, XIAO X, *et al.* SLM-based laboratory simulations of Kolmogorov and non-Kolmogorov anisotropic turbulence[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(15): 4740-4744.
- [6] KE Xi-zheng, ZHANG Lin. Beam spreading and wander of partially coherent Airy beam propagating in atmospheric turbulence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(1): 0101003.
柯熙政, 张林. 部分相干艾里光在大气湍流中的光束扩展与漂移[J]. 光子学报, 2017, **46**(1): 0101003.
- [7] HAFIZI B, SPRANGLE P. Diffraction effects in directed radiation beams[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1991, **8**(5): 705-717.
- [8] KE Xi-zheng, ZHANG Yu. Scintillation of partially coherent beam in atmospheric turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(1): 0106001.
柯熙政, 张宇. 部分相干光在大气湍流中的光强闪烁效应[J]. 光学学报, 2015, **35**(1): 0106001.
- [9] CHENG Ming-jian, GUO Li-xin, LI Jiang-ting. Beam wander of Bessel-Gaussian beams in non-Kolmogorov turbulent atmosphere[C]. Applied Computational Electromagnetics Society Symposium, IEEE, 2017: 1-2.
- [10] CHENG Ming-jian, GUO Li-xin, LI Jiang-ting, *et al.* Propagation properties of an optical vortex carried by a Bessel-Gaussian beam in anisotropic turbulence[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2016, **33**(8): 1442-1450.
- [11] XU Ying, ZHU Yun, ZHANG Yi-xin. Crosstalk probability of the bandwidth-limited orbital angular momentum mode of Bessel Gaussian beams in marine-atmosphere turbulence[J]. *Optics Communications*, 2018, **427**: 493-496.
- [12] LI Yu-jie, ZHU Wen-yue, RAO Rui-zhong. Simulation of random phase screen of non-Kolmogorov atmospheric turbulence[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(12): 1211001.
李玉杰, 朱文越, 饶瑞中. 非 Kolmogorov 大气湍流随机相位屏模拟[J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(12): 1211001.
- [13] 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [14] 徐灿. 基于涡旋光束的自由空间光通信系统传输性能研究[D]. 北京: 北京邮电大学. 2015.
- [15] EYYUBGGLU H T, BAYKAL Y, SERMUTLU E, *et al.* Scintillation advantages of lowest order Bessel - Gaussian beams[J]. *Applied Physics B*, 2008, **92**(2): 229.
- [16] EYYUBGGLU H T, BAYKAL Y, SERMUTLU E, *et al.* Scintillation index of modified Bessel-Gaussian beams propagating in turbulent media[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2009, **26**(2): 387-394.
- [17] PENG Juan, ZHANG Li, ZHANG Ke-cheng, *et al.* Channel capacity of OAM based FSO communication systems with partially coherent Bessel-Gaussian beams in anisotropic turbulence[J]. *Optics Communications*, 2018, **418**: 32-36.
- [18] CHENG Ming-jian, GUO Li-xin, LI Jiang-ting, *et al.* Effects of asymmetry atmospheric eddies on spreading and wander of Bessel-Gaussian beams in anisotropic turbulence[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, **10**(3): 6100510.

Foundation item: The Key Industrial Innovation Chain Project in Industrial Domain (No. 2017ZDCXL-GY-06-02), Open Research Fund of State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology (No. SKL2016KF05), Huawei Innovation Research Program (No. HO2017050001AG), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. CJT150502) and Supported by the Innovation Fund of Xidian University (No. 20108183448)

引用格式: SUN Ri-dong, GUO Li-xin, CHENG Ming-jian, *et al.* Propagation Characteristics of Bessel-Gaussian beam in Anisotropic Atmosphere[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(12): 1201002

孙日东, 郭立新, 程明建, 等. 贝塞尔高斯光束在各向异性湍流中的传输特性[J]. 光子学报, 2018, **47**(12): 1201002