

大气湍流下轨道角动量复用态串扰分析

柯熙政, 宁川*, 王姣

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 以加载 QPSK 调制信号的轨道角动量(OAM)光束为传输载波,以多个相位屏模拟大气湍流,研究不同大气湍流强度下 OAM 复用态的串扰情况。通过对复用光束光强和相位研究,得出在 OAM 复用态光强受到湍流影响时会发生明显的闪烁现象,光功率分散,相位发生旋转弯曲,且湍流强度越大,受到的影响越大。选用螺旋谱分析不同湍流强度下各 OAM 复用态之间的弥散程度,当大气湍流强度增加时,OAM 态之间的弥散程度增加,且较强湍流会导致 OAM 复用态失真。同时,考虑 OAM 复用态之间的模式串扰以及每路携带信息的 OAM 态因大气信道引起的混合噪声而造成的码间干扰,对比研究了不同大气湍流强度下系统误码率随传输距离的变化,结果表明:系统误码率随传输距离的增长而增大,强湍流之下光束误码率会随着传输距离增长到一定程度后趋于平稳,弱湍流之下光束误码率会随着传输距离的增长而增大。

关键词: 轨道角动量复用; 大气湍流; 螺旋谱; 误码率

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1122002

Crosstalk analysis of orbital angular momentum-multiplexed state under atmospheric turbulence

Ke Xizheng, Ning Chuan*, Wang Jiao

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The orbital angular momentum (OAM) beam loaded with the QPSK modulated signal was used as the transmission carrier to research the crosstalk of OAM multiplexed state under different atmospheric turbulence intensity, atmospheric turbulence was simulated by several phase screens. The study of the intensity and phase of the beam showed that there was obvious flickering phenomenon, when the light intensity of OAM multiplexed state was affected by turbulence. The greater the turbulence intensity, the greater impact was. The spiral spectrum was used to analyze the OAM multiplexed state dispersion degree between different turbulence intensity. With the increase of turbulence intensity, dispersion degree between OAM states increased, and the strong turbulence led to the OAM multiplexed state beam distortion. Meanwhile, considering the mode crosstalk between OAM multiplexed state and the inter-symbol interference of OAM states of each carrying information by the mixed noise model caused by atmospheric channel. The bit error rate(BER) changing with propagation distance under different atmospheric turbulence intensity was comparatively studied. The results show that the system

收稿日期:2018-06-10; 修订日期:2018-07-20

基金项目:国家自然科学基金(61377080, 60977054);陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)

作者简介:柯熙政(1962-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事自由空间光通信方面的研究。Email: xzke@263.net

BER increases with the increase of the propagation distance. Under strong turbulence the error rate of the light beam tends to be stable as the transmission distance increases to some extent. Under the weak turbulence the error rate of the light beam increases with the increase of the transmission distance.

Key words: orbital angular momentum-multiplexed; atmospheric turbulence; spiral spectrum; bit error rate

0 引言

OAM 光束与普通光束相比具有特殊的螺旋型相位结构,其涡旋中心光强为零且存在相位奇点。基于 OAM 态复用的通信系统已成为光通信领域的研究热点之一^[1],被广泛应用于光纤通信^[2]、自由空间光通信^[3]和无线通信^[4]中。由于 OAM 本质是一空间分布函数,基于 OAM 态的复用通信系统不可避免地会受到大气湍流的影响。所以,研究大气湍流对 OAM 复用态的影响是十分必要的。

对于多路复用 OAM 光束,大气湍流将导致接收到的光信号的波动,导致接受光信号产生起伏,引起模间串扰^[5]。2008 年,Anguita J 等^[6]分析纠正了基于 Kolmogorov 模型大气湍流导致空间传输中通信光链路间多路 OAM 的串扰效应问题。2009 年,Tyler G 等^[7]提出了大气湍流使在其中传播的 OAM 光的光波参量发生随机改变、使 OAM 光束在传输中的强度、相位等遭到破坏。2012 年,Rodenburg 等^[8]通过实验仿真了 Kolmogorov 大气湍流对 OAM 信道产生串扰的影响。2014 年,柯熙政,郭新龙^[9]对大气斜程传输时高阶贝塞尔高斯光束轨道角动量进行了研究。同年,邹丽等^[10]通过改变大气湍流折射率结构常数

和传输距离,分析了 Kolmogorov 大气湍流对 OAM 态复用通信系统归一化接受功率、误码率等的影响。

在现有研究中涡旋光束在湍流中传输时多数是以单束涡旋光束为对象^[7-9]。研究发现相对于单数涡旋光束,OAM 复用态能更好地提高系统的频带利用率和系统传输容量,但其在湍流中传输时不可避免地会受到影响。文中在此背景下,分析了 OAM 复用态在湍流中传输时受到的串扰。研究了不同强度的湍流对复用光束光强和相位分布的影响。分析了 OAM 复用态光束在不同湍流强度下光束之间的弥散程度,选用螺旋谱定量表征光束受到的串扰大小。基于 OAM 复用通信方案中,都假设信道传输噪声为高斯白噪声^[6,10],文中考虑了实际湍流信道引起的乘性和加性噪声,分析对比了不同湍流强度下光束传输过程中系统误码率随传输距离的变化情况,为研究 OAM 复用态在大气湍流中传输时受到的实际噪声提供了参考。

1 理论模型

1.1 涡旋光束复用态产生原理

大气湍流传输中 OAM 光束复用通信系统模型如图 1 所示。先对输入原始比特流进行 QPSK 调制,

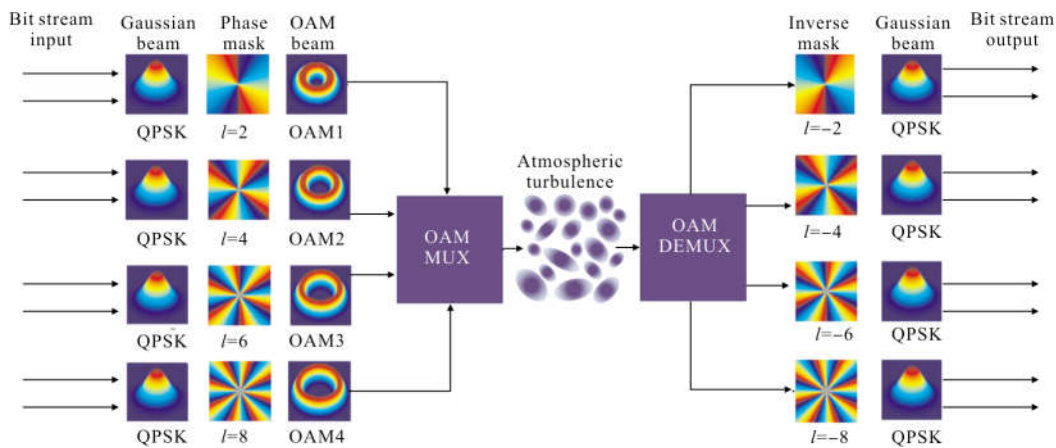


图 1 大气湍流传输中 OAM 复用态通信系统模型

Fig.1 OAM multiplexed communication system model for atmospheric turbulence transmission

在固体激光器产生的高斯光束上通过光调制技术加载上调制好的传输信号。将携带调制信息的高斯光束利用空间相位掩膜转换成对应的 OAM 光束之后再行复用,OAM 复用态经过大气湍流传输后,在接收端对 OAM 复用态进行解复用。最后,提取出光束上加载的 QPSK 信号进行解调从而恢复原始比特流。

实现 OAM 态复用的关键是产生涡旋光束。研究中较为常见的涡旋光束有拉盖尔高斯涡旋光束(Laguerre-Gaussian, LG),贝塞尔高斯涡旋光束(Bessel-Gaussian, BG)和厄米高斯涡旋光束(Hermite-Gaussian, HG)。其中 LG 光束是实验室中具有代表性的涡旋光束。携带有 OAM 的 LG 光束在束腰($z=0$)处的归一化柱坐标系表达式为:

$$LG_{l,p}(r,\phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{2p!}{(l+p)!}} \frac{1}{w_0} \left(\frac{r}{w_0}\right)^{|l|} L_p^{(|l|)}\left(\frac{2r^2}{w_0^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right) \exp(il\phi) \quad (1)$$

式中: l 为 LG 光束的拓扑荷数,当 $l=0$ 时, $LG_{l,p}(r,\phi,z)$ 为高斯光束; r 为传输轴的辐射距, ϕ 为相位角, z 为传输距离; p 为径向指数; w_0 是高斯光束腰半径, $zr=\pi w_0/\lambda$ 为瑞利距离; $k=2\pi/\lambda$ 是波矢量, λ 是波长;理论上 OAM 态的拓扑荷数 l 可以是任意值,并且任意不同拓扑荷数的 OAM 态是相互正交的。

任何一种光束都可以分解成一系列螺旋谐波 $\exp(il\phi)$ 的叠加:

$$u(r,\phi,z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{l=-\infty}^{\infty} a_l(r,z) \exp(il\phi) \quad (2)$$

公式(4)中的系数 $a_l(r,z)$ 为:

$$a_l(r,z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{2\pi} u(r,\phi,z) \exp(-il\phi) d\phi \quad (3)$$

对公式(3)进行径向积分,得到单一 OAM 态所占的相对功率为:

$$P_l = \int_0^{\infty} |a_l(r,z)|^2 r dr \quad (4)$$

最后可以得到一束光中各 OAM 所占的相对能量:

$$R = P_l / \sum_l P_l \quad (5)$$

这一比例关系即为光束螺旋谱。

同时利用 OAM 的正交性,将信息分别加载到

各路 OAM 光上,多束相互正交的 OAM 光复用在一起进行传输,就可以实现 OAM 的复用通信:

$$S(t) = s_1(t)U_1 + s_2(t)U_2 + s_3(t)U_3 + s_4(t)U_4 \quad (6)$$

由于 OAM 的正交特性,在接收端可利用公式(7)提取出相应的信息:

$$s_i(t) = (S(t), U_i) \begin{cases} i=j & \int U_i U_j^* = \int |\Phi_i|^2 \\ i \neq j & \int U_i U_j^* = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $s_i(t)$ 为调制到光束上的信息; U_i 为不同 OAM 态。

1.2 大气湍流相位屏的数值模拟

功率谱反演法模拟大气湍流相位屏的思路是利用大气湍流功率谱对一个复高斯随机矩阵进行滤波,再通过逆傅里叶变换(IFFT)获得湍流畸变相位^[11]:

$$\varphi(x,y) = C \sum_{K_x} \sum_{K_y} a(K_x, K_y) \sqrt{\Phi(K_x, K_y)} \exp[i(K_x x, K_y y)] \quad (8)$$

式中:空域内 $x=m\Delta x, y=n\Delta y, \Delta x, \Delta y$ 为取样间隔, m, n 为整数。波束域内 $K_x=m'\Delta K_x, K_y=n'\Delta K_y, \Delta K_x, \Delta K_y$ 为取样间隔, m', n' 为整数。通过对均值为 0,方差为 1 的高斯随机数进行 FFT 可得到 $a(K_x, K_y)$ 。常数 C 来源于标度因子 $\sqrt{\Delta K_x, \Delta K_y}$,公式(8)适用于各种大气湍流功率谱。文中假设大气湍流传输模型为 Von Karman 功率谱模型,即有:

$$\varphi(m,n) = \sum_{m'}^{N_x} \sum_{n'}^{N_y} a(m', n') \frac{2\pi}{\sqrt{L_x L_y}} \sqrt{0.00058 r_0^{-5/6}} \cdot (f_x^2 + f_y^2 + f_0^2)^{-11/12} \exp\left[i2\pi\left(\frac{mm'}{N_x} + \frac{nn'}{N_y}\right)\right] \quad (9)$$

式中: $r_0=0.185\left[\lambda^2 / \int_z^{z+\delta z} C_n^2(\zeta) d\zeta\right]^{3/5}, f_0=1/L_0$ 为湍流外尺 L_0 对应的空间波束; $N_x \times N_y$ 为相位屏网格。

对于实际大气无线光通信系统,噪声包括背景光和接收机噪声以及大气湍流引起的大气闪烁^[12]。由于大气湍流的干扰,光束的相位和振幅都将受到影响,导致信号的衰落出现随机过程的特性,其中在中-强湍流情况下服从 Gamma-Gamma 分布,弱湍流情况下服从对数正态分布。选用大气折射率结构

常数 C_n^2 来表征湍流的强弱。

2 仿真结果分析

由公式(1)得出不同拓扑荷数的 LG 光束在光源处二维光强和相位分布如图 2 所示,束腰半径 $w=5\text{ mm}$,波长 $\lambda=632.8\text{ nm}$,拓扑荷数 l 分别取 2、

4、6、8。图 2(a1)~(d1)对应不同拓扑荷数的光强分布。图 2(a2)~(d2)对应不同拓扑荷数的相位分布。由图 2(a1)~(d1) 看出随着 OAM 光束拓扑荷数增大,其环状光束在束腰处的光强半径随之增大。由图 2(a2)~(d2)看出 OAM 光束相位扇叶片数与对应 l 值相等。

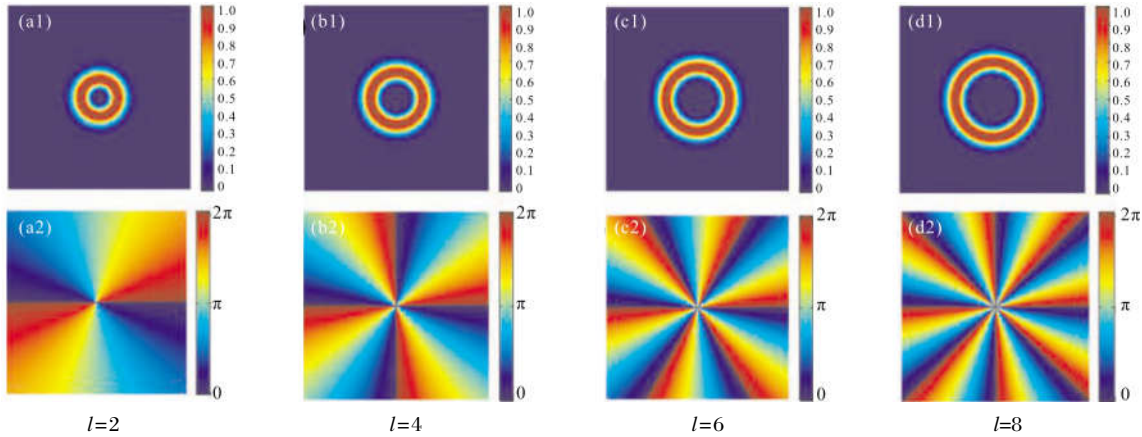


图 2 LG 光束在光源处二维光强和相位分布

Fig.2 2D intensity and phase distribution of LG beams at the light source

2.1 光强相位分析

OAM 复用态在不同传输条件下的光强和相位分布如图 3 所示。仿真中湍流外尺度 $L_0=20\text{ m}$ 。由图 3(a1)看出复用光强图外围存在 6 个暗斑和 2 个亮斑共 8 个光斑。由图 3(a2)看出复用相位图外围“叶片”数为 8。光斑数量及“叶片”数量均是由 OAM 复用态中最大拓扑荷数值决定的。由图 3(b1)、(b2) 看出在没有受到大气湍流影响且复用光束传输 1 000 m 时,复用光强图对比于原始相位发生旋

转,复用相位图“叶片”发生弯曲旋转。由图 3(c1)、(d1) 看出在大气湍流影响下,OAM 复用态光强会发生明显的闪烁现象,光功率分散,光斑强度随着湍流强度增大弥散程度逐渐增强。在强湍流条件下光强分布失真严重,传输后的光束已不能准确判断轨道角动量信息。由图 3(c2)、(d2)、(e2)看出由于大气扰动,OAM 复用态光束相位产生不同程度的畸变,在相位跃变处“每一扇叶片”的分界处逐渐弯曲、模糊变形。且湍流强度越大,相位畸变越严重。

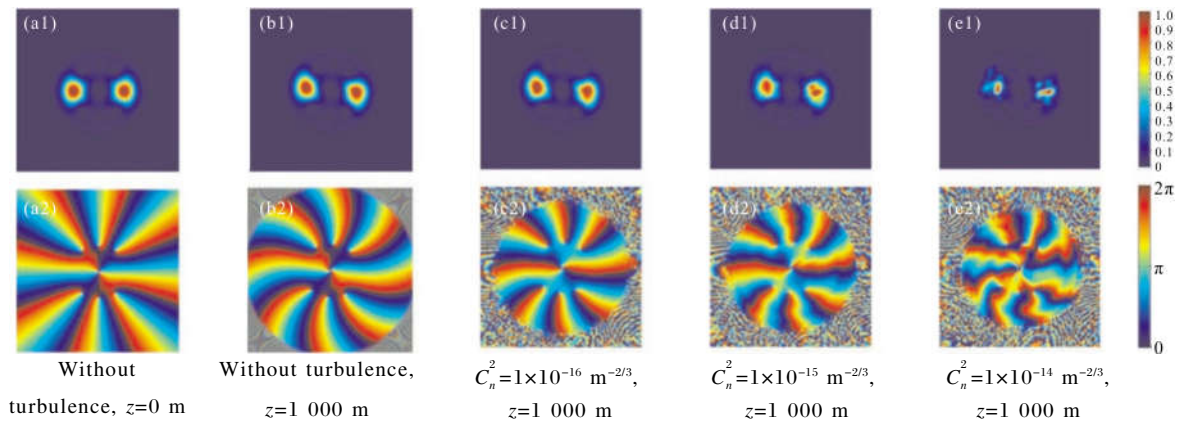


图 3 不同传输条件下 OAM 复用态光强和相位分布

Fig.3 Light intensity and phase distribution of OAM multiplexed beams under different transmission conditions

2.2 螺旋谱分析

OAM 复用态在不同湍流强度下传输 1 000 m 的螺旋谱分布如图 4 所示。图 4(a)表示在无湍流影响下,系统传输 1 000 m 时 4 路 OAM 光束相对归一化功率,此时 $l=2$ 的光束相对功率占比最大, $l=8$ 的光束相对功率占比最小。图 4(b)表示湍流为 $C_n^2=1 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$,系统传输 1 000 m 时的螺旋谱分布图。可以看出经过大气湍流干扰后 OAM 纯态被破坏,各 OAM 态都掺杂进不同拓扑荷值的 OAM 态,并向其它信道弥散,各 OAM 态之间不再正交。图 4(c)表示湍流强度为 $C_n^2=1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$,系统传输 1 000 m 时的螺旋谱分布图,由于大气湍流强度的增加,各 OAM 态在相邻模式之间的串扰相对于图 4(b)有所增大。图 4(d)表示湍流强度为 $C_n^2=1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,系统传输 1 000 m 时的螺旋谱分布图,此时模式之间存在较大的模式串扰,各光束不再保持原有的相对

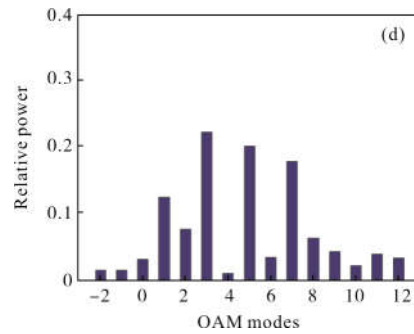


图 4 OAM 复用态光束在不同湍流强度下传输 1 000 m 之后的螺旋谱分布

Fig.4 Spiral spectrum distribution of OAM multiplexed beam transmitting 1 000 m after different turbulence intensity

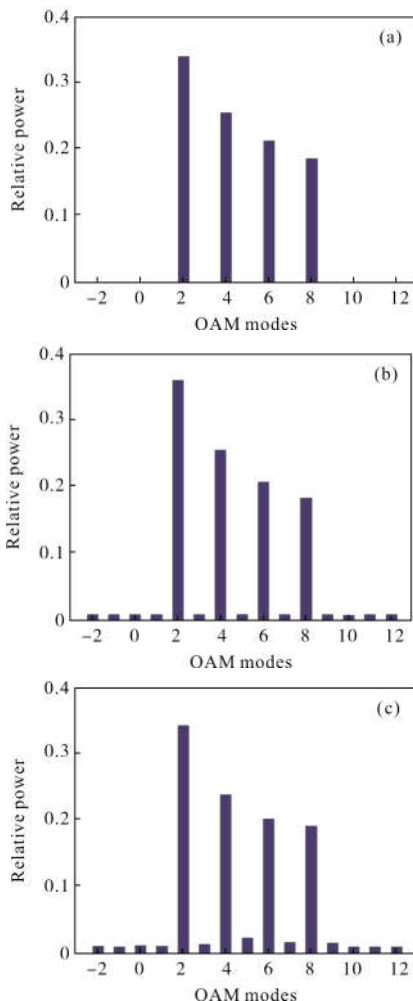
功率分布状态,相邻模式之间弥散严重,拓扑荷数为 3、5、7 的 OAM 态相对功率所占比例较大,分别为 0.218 8、0.196 9、0.173 6,已经不能从螺旋谱分布上准确判断光束信息。

由上述分析可以看出:OAM 复用态光束经过大气湍流的传播,涡旋光束的漩涡核心偏离原来的位置,造成相邻 OAM 模式之间产生串扰。这种串扰来自于携带信息的 OAM 光束的功率迁移,造成原本光束之间严格的正交性被破坏而产生。

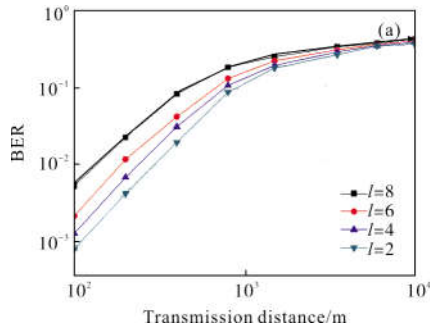
2.3 误码率分析

OAM 复用态经湍流传输系统误码率随传输距离的变化如图 5 所示。图 5(a)中湍流强度 $C_n^2=1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,此时系统中大气信道噪声可以等效为加性噪声和 Gamma-Gamma 分布下的乘性噪声之和,图中可以明显地看出系统误码率随传输距离的增大而增大,说明传输距离增大,OAM 复用态之间的串扰和大气湍流对其产生的影响也随之而增大,系统性能下降。且系统误码率在传输到一定距离之后达到饱和和不再增长,当系统传输距离增大到 10 000 m 时误码率达到到 0.4 以上。

图 5(b)中湍流强度 $C_n^2=6.5 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$,此时系统中大气信道噪声可以等效为加性噪声和对数正态分布下的乘性噪声之和。在弱湍流下,系统误码率随传输距离变化情况规律与中强湍流下基本相同,区别在于,当 OAM 复用系统在弱湍流中传输时,因为受到的串扰相对较小,所以在传输一定距离之后,系统误码率仍随系统传输距离的增大而增加,且在传

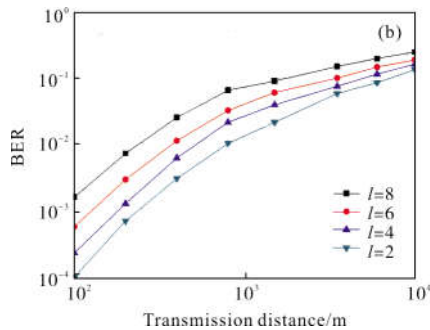


输距离增大到 10 000 m 时误码率增大到 0.2 以上。



(a) 中强湍流

(a) Intermediate -strong turbulence



(b) 弱湍流

(b) Weak turbulence

图 5 不同湍流强度下系统误码率随传输距离变化

Fig.5 BER of the system vs transmission distance under different turbulence

同时由图 5 可知,同一湍流强度和传输距离下, OAM 态光束拓扑荷数越大,系统误码率越大。OAM 态光束拓扑荷数相同时,随着传输距离增大,系统误码率随之增大,系统传输性能下降。

3 结 论

文中主要从 OAM 复用态光束光强和相位分布、模式串扰和系统误码率三个方面,仿真分析了大气湍流对 OAM 复用态产生的串扰影响。研究表明:(1) 随大气湍流的强度增加和传输距离增大 OAM 复用态光束光强闪烁现象越来越明显、复用态相位“页片”畸变程度越来越严重。(2) OAM 复用态各光束之间的弥散程度随湍流强度增加而增强,当湍流强度较强为 $C_n^2=1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 时,拓扑荷数为 3、5、7 的 OAM 态相对功率所占比例较大,分别为 0.218 8、0.196 9、0.173 6,说明已不能从螺

旋谱分布判断光束准确信息,此时 OAM 复用态已失真。(3) 由于 OAM 复用系统受到的码间干扰和信道串扰,在湍流中传输时误码率会受到明显的影响。在弱湍流下,系统传输距离越长串扰越严重,在传输距离增大到 10 000 m 时误码率增大到 0.2 以上;在中强湍流下,OAM 态受到的串扰会在光束传播到一定距离后饱和,系统传输距离增大到 10 000 m 时误码率增大到 0.4 以上。同一湍流强度下,OAM 态的拓扑荷数越大,误码率越大。

参考文献:

- [1] Torres J P. Optical communications: multiplexing twisted light[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 420-422.
- [2] Qiao Wen, Gao Shecheng, Lei Ting, et al. Transmission of orbital angular momentum modes in grape-type microstructure fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2017, 44(4): 0406002. (in Chinese)
- [3] Fang Y, Yu J J, Chi N. A novel PON architecture based on OAM multiplexing for efficient bandwidth utilization [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 7900506.
- [4] Amburini F, Mari E, Sponselli A, et al. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test [J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14: 033001.
- [5] Lou Yan, Chen Chunyi, Zhao Yiwu, et al. Istics of Gaussian vortex beam in atmospheric turbulence transmission [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10 (6): 768-776. (in Chinese)
- [6] Anguita J A, Neifeld M A, Vasic B V. Turbulence-induced channel crosstalk in an orbital angular momentum-multiplexed free-space optical link. [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(13): 2414-2429.
- [7] Cheng M, Guo L, Li J, et al. Propagation properties of an optical vortex carried by a Bessel-Gaussian beam in anisotropic turbulence [J]. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 2016, 33(8): 1442-1450.
- [8] Rodenburg B, Lavery M P, Malik M, et al. Influence of atmospheric turbulence on states of light carrying orbital angular momentum [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3735-3737.
- [9] Ke Xizheng, Gou Xinlong. Orbital angular momentum research of high order Bessel Gaussian beam in a slant

- atmosphere turbulence. [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3744–3749. (in Chinese)
- [10] Zou Li, Zhao Shengmei, Wang Le. Effects of Atmospheric turbulence on communication performance of orbital angular momentum [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(9): 52–57. (in Chinese)
- [11] Xu Guangyong. Numerical simulation of laser transmission in atmospheric turbulence and influence analysis [D]. Chengdu: Electronic Science and Technology University, 2008. (in Chinese)
- [12] Chen Mu, Ke Xizheng. Effect of atmospheric turbulence on the performance of laser communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0822009. (in Chinese)