

doi:10.3788/gzxb20144309.0901001

大气湍流对轨道角动量态复用系统通信性能的影响

邹丽^{1,2}, 赵生妹¹, 王乐¹

(1 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 南京 210003)

(2 南通大学 电子信息学院, 江苏 南通 226019)

摘要:通过数值仿真,以多个相位屏模拟大气湍流,研究大气湍流对轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)态复用通信系统质量的影响. 改变大气湍流折射率结构常量 C_n^2 和传输距离 z , 分析其对 OAM 态复用系统归一化接收功率、误码率等的作用. 研究结果表明当大气湍流强度增加和传输距离增长时,复用系统归一化接收功率下降、误码率增加. 当 C_n^2 增大到 $5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 时,系统归一化接收功率下降到 0.2 以下,误码率增大到 0.3 以上;当传输距离增大到 10 000 m,系统归一化接收功率下降到 0.3 以下,误码率增大到 0.35 以上. 同时,对比不同方位角指数 l 取值的两个 OAM 态复用系统受大气湍流的影响,发现: l 取值越接近的系统,受大气湍流影响越大. 在等同光学信噪比下大气湍流导致 OAM 态复用系统误码率性能降低 2 至 3 个数量级. 该研究对 OAM 态复用系统的实用化具有积极的参考作用.

关键词:轨道角动量;复用系统;大气湍流;折射率结构常量;传输距离;归一化接收功率;误码率

中图分类号: TN929.12; O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)09-0901001-6

The Effects of Atmospheric Turbulence on the Orbital Angular Momentum-multiplexed System

ZOU Li^{1,2}, ZHAO Sheng-mei¹, WANG Le¹

(1 College of Telecommunications and Information engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

(2 College of Electronic Information, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226000, China)

Abstract: The effects of turbulence aberrations on Orbital Angular Momentum (OAM)-multiplexed system by numerical simulation were analysed, where the turbulence aberration was simulated by several random phase screens generated by Kolmogorov model. The performances of normalized-received power and Bit Error Rate (BER) of the OAM-multiplexed system were characterized through changing the refractive index structure constant C_n^2 and transmission distance z . The results show that normalized-received power decreases and the BER performance increases while the constant C_n^2 and transmission distance z increases. The normalized-received power decreases to less than 0.2 and BER increases to more than 0.3 when the refractive index structure constant C_n^2 is $5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$. The normalized-received power decreases to less than 0.3 and BER increases to more than 0.35 while transmission distance z reaches 10 000 m. The comparison of the BER performance between two OAM-multiplexed systems with different values of the azimuthal index l is characterized. The results show that the OAM-multiplexed

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61271238, 61371111, 61371112)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20123223110003)、江苏省高校自然科学研究项目(No. 11KJA510002)、江苏省高校研究生科研创新计划基金(No. CXZZ13_0489)和南通市应用研究计划基金(No. BK2013052)资助

第一作者:邹丽(1981-),女,讲师,博士研究生,主要研究方向为自由空间光通信中 OAM 复用通信技术. Email: zou.l@ntu.edu.cn

导师(通讯作者):赵生妹(1968-),女,教授,博士,主要研究方向量子信息技术和无线通信与信号处理技术. Email: zhaosm@njupt.edu.cn

收稿日期:2013-11-18; **录用日期:**2014-02-14

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

system which has closer values of l is more affected by atmospheric turbulence. At last, the BER with atmospheric turbulence is decreased by two to three orders of magnitude compared with that one without atmospheric turbulence at the same OSNR. The researchs have a good reference value for practical application of OAM-multiplexed system.

Key words: Orbital angular momentum; Multiplexing system; Atmospheric turbulence; Refractive index structure constant; Transmission distance; Normalized-received power; Bit error rate

OCIS Codes: 010.1330; 050.4865; 060.4230; 060.4510

0 引言

基于轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM) 态复用系统已经成为自由空间光 (Free-Space Optical, FSO) 通信的研究热点之一^[1]. OAM 态是光子角动量的一种, 与波函数的空间分布有关. 与光子自旋角动量 (Spin Angular Momentum, SAM) 不同, 对于单个光子, 理论上 OAM 可获得无穷多值的特征状态, 且不同 OAM 态间相互正交. OAM 态复用系统能极大提高频带利用率^[2].

基于单个 OAM 的通信早已开展, 2005 年, Gibson 等在实验室演示通过 OAM 态编码的信息传输^[3]. 2011 年 8 月, Martelli 等通过实验实现两路 1.25 Gbit/s 二进制强度调制的 OAM 信号的自由空间光通信 (Free Spuce Optics Communication, FSO) 复用通信^[4]. 2012 年 2 月, Karimi 等通过实验, 获得了基于 OAM 态的时分复用/解复用方法^[5]. 2013 年, Huang 等实现 32 路独立的 20 Gb/s 16 进制正交振幅调制 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) 数据流的 OAM 复用传输^[6].

然而, 自由空间光通信系统不可避免地受到空间环境的影响^[7], 特别是大气湍流对信号传输产生的影响, 如光强闪烁^[8]、光束弯曲和漂移^[9]以及接收信号时间延迟^[10]等, 导致接收信号平均功率丢失和瞬时接收

功率的波动, 严重影响通信系统的质量. 特别是, OAM 态本质是一空间分布函数, 基于 OAM 态的通信系统不可避免受到大气湍流的影响^[11-14], 2009 年 Anguita 等用 Von Karman 功率谱产生随机相位屏模拟大气湍流, 通过数值仿真分析大气湍流对 OAM 复用激光链路产生串扰的影响^[11]. 2012 年, Malik 等分析了 Kolmogorov 大气湍流对 OAM 信道容量的影响^[12]. 同年, Rodenburg 等通过实验仿真了 Kolmogorov 大气湍流对 OAM 信道产生串扰的影响^[13]. 2013 年 10 月, Ren 等给出大气湍流对 OAM 态复用系统影响的实验报道^[14].

本文分析了大气湍流对 OAM 态复用系统的影响, 给出不同大气湍流强度和不同传输距离下, OAM 态复用系统接收平均功率和接收误码率仿真曲线, 同时把接收端解复用的四路信号结果放在一起比较, 完整地分析了 OAM 态复用系统受大气湍流影响的性能.

1 大气湍流下 OAM 态复用系统模型

图 1 是大气湍流情形下 OAM 态复用系统模型. 在发送端, 先将基带信号进行 16QAM 调制, 后转化为 OAM 光束, 多路 OAM 光束进行复用, 经过大气湍流信道传输; 到接收端, 先进行多路 OAM 复用光束分离, 后进行 16QAM 解调恢复基带信号.

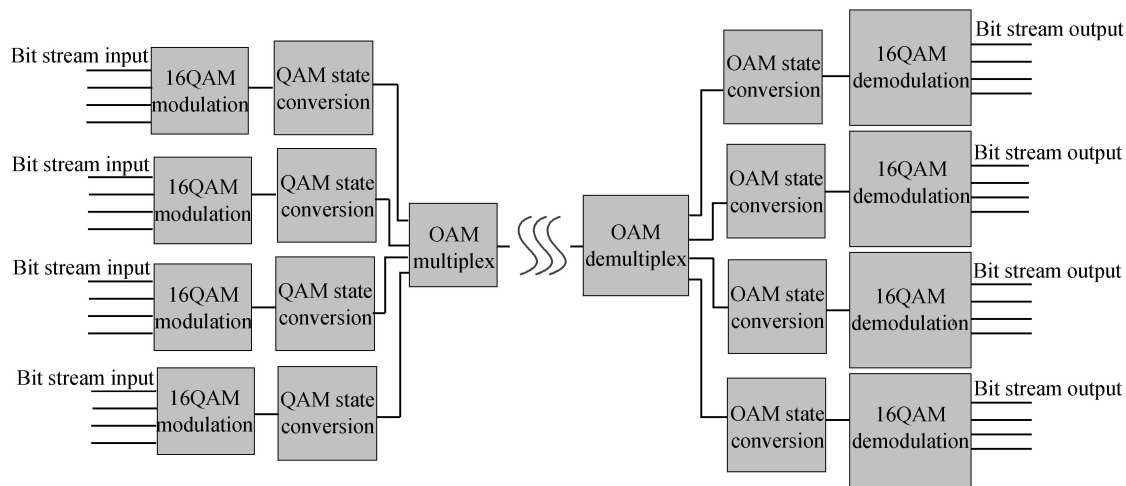


图 1 大气湍流下 OAM 态复用系统

Fig. 1 The schematic diagram of OAM-multiplexed system under atmospheric turbulence

OAM 态有多种表现形式, 现采用拉格尔斯高斯 (Laguerre-Gauss, LG) 光产生 OAM 态^[15]. 载有 OAM

的 LG 光束在束腰($z=0$)位置的归一化柱坐标系表示为

$$LG_{l,p}(r,\phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{2p!}{(|l|+p)!} \right)^{1/2} \frac{1}{\omega_0} \left(\frac{r}{\omega_0} \right)^{|l|} \cdot L_p^{|l|} \left(\frac{r^2}{\omega_0^2} \right) \exp \left(-\frac{r^2}{2\omega_0^2} \right) \exp(i l \phi) \quad (1)$$

式中 l 为方位角指数, p 为辐射指数, ω_0 是高斯光束的束腰半径, r 是光波传播的辐射半径, ϕ 是光波传播的辐射角, $L_p^{|l|}$ 是 Laguerre 多项式. 在柱形极坐标下, LG 光束在 z 轴的传播用 OAM 态特征算子表示, 其中

$$\hat{L}_z = -i\hbar \partial / \partial \phi \quad (2)$$

因此, 沿 z 轴传输 z 距离后 LG 光束归一化为

$$LG_{l,p}(r,\phi,z) = R_{l,p}(r,z) \exp(i l \phi) \cdot \exp \left[-i(2p + |l| + 1) \tan^{-1} \frac{z}{z_R} \right] \quad (3)$$

式中

$$R_{l,p}(r,z) = \frac{1}{\omega(z)} \left(\frac{2p!}{\pi(|l|+p)!} \right)^{1/2} \left(\frac{\sqrt{2}r}{\omega(z)} \right)^{|l|} \cdot L_p^{|l|} \left(\frac{2r^2}{\omega^2(z)} \right) \exp \left(-\frac{r^2}{\omega^2(z)} \right) \exp \left(-\frac{ikr^2}{2R} \right)$$

并且 $\omega = \omega_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}$, $R = z[1 + (z_R/z)^2]$, $z_R = \frac{1}{2} k \omega_0^2$, k 为波数.

通过复用, 获得 OAM 叠加态. 当 OAM 叠加态到达接收端时, 可通过两种方法实现 OAM 复用信号分离.

1) 依据文献[2], 假设有 N 路光束复用传输, 每路 OAM 光用 $u_0(r,z) e^{im\phi}$ 表示, 其中 $u_0(r,z)$ 为高斯光, m 表示 OAM 态方位角指数. 在接收端将需要提取的光束方位角指数 l 取负后, 与接收 OAM 态复用光束相乘, 再通过圆孔透镜滤出解复用的高斯光, 即

$$U_{\text{DEMUX}}(r,\phi,z) = u_0(r,z) \cdot e^{-i l \phi} \cdot \sum_{m=1}^N u_0(r,z) \cdot e^{im\phi} = |u_0(r,z)|^2 + \sum_{m=1, m \neq l}^N |u_0(r,z)|^2 \cdot e^{i(m-l)\phi} \quad (4)$$

2) 依据文献[16], 假设同样有 N 路光束复用传输, 每路 OAM 光用 $LG_{m,p}(r,\phi,z)$ 表示, 下标 m 表示 OAM 态方位角指数. 利用 LG 光的正交性, 将需要提取的方位角指数为 l 的 OAM 光束与接收 OAM 态复用光束进行求内积得到

$$U_{\text{DEMUX}}(r,\phi,z) = (LG_{l,p}(r,\phi,z), \sum_{m=1}^N LG_{m,p}(r,\phi,z)) = \sum_{m=1}^N \int LG_{l,p}(r,\phi,z) LG_{m,p}^*(r,\phi,z) r dr d\phi = \int |LG_{l,p}|^2 r dr d\phi \quad (5)$$

现利用第二种方法分离 OAM 复用信号.

大气湍流模型采用随机产生的多个相位屏来仿真[17]. 模型中, 随机分布的相位屏表示大气折射率波动的随机复域值, 可用 $N \times N$ 维复数矩阵表示, 其方差

决定于大气折射率波动频谱. Kolmogorov 大气折射率波动频谱表示为[18]

$$\Phi_n(k_x, k_y) = 0.033 C_n^2 \times \left[1 + 1.802 \sqrt{\frac{k_x^2 + k_y^2}{k_l^2}} - 0.254 \left[\frac{k_x^2 + k_y^2}{k_l^2} \right]^{7/6} \right] \exp \left[-\frac{k_x^2 + k_y^2}{k_l^2} \right] \cdot \left[k_x^2 + k_y^2 + \frac{1}{L_0^2} \right]^{-11/6} \quad (6)$$

式中, k_x^2 和 k_y^2 分别为 X 和 Y 方向上的频率波数谱数据, C_n^2 是折射率结构常量, L_0 是湍流的外尺度, $k_l = 3.3/l_0$, l_0 为湍流的内尺度.

相位频谱由折射率波动频谱表示为

$$\Phi(k_x, k_y) = 2\pi(k_x^2 + k_y^2) \Delta Z \Phi_n(k_x, k_y) \quad (7)$$

式中 ΔZ 为 z 传播方向上两相邻相位屏的距离. 由此可产生随机相位屏

$$\theta(x, y) = \text{FFT}(C\sigma(k_x, k_y)) \quad (8)$$

式中 C 是一个均值为 0, 方差为 1 的 $N \times N$ 维复数随机矩阵; $\sigma^2(k_x, k_y)$ 为随机相位屏频谱方差, 其表示为

$$\sigma^2(k_x, k_y) = \left(\frac{2\pi}{N\Delta x} \right)^2 \Phi(k_x, k_y) \quad (9)$$

式中 N 为栅格点数, Δx 为栅格距离. 设传播方向沿 z 轴, x 方向和 y 方向具有相同的栅格单元数和相同的栅格距离.

2 大气湍流对 OAM 态复用系统通信性能影响

光在自由空间传输时, OAM 态光束受大气湍流的影响. 这将导致 OAM 态复用系统接收平均功率丢失和误码率的产生.

仿真参量设定为: 根据近地面水平光通信中的大气湍流特点, 在地表层到地面高度 100 m 范围内, 大气湍流外尺度 L_0 随地面观测点高度成线性变化, 而超过地面高度 100 m 以上, 由于大气湍流的分层效应, L_0 的水平维度要比其垂直高度大很多[18], 因此, 本文选择信道高度为 30 m, 大气湍流外尺度 $L_0 = 50$ m, 大气湍流内尺度 $l_0 = 0.002$ m, 这个湍流尺度足以保证在 $C_n^2 = 5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 的湍流情况下的光束传输[19]. 束腰 $\omega_0 = 4$ mm, 波长选择工作于大气窗口的光波长 $\lambda = 850$ nm, 栅格点数 $N = 512$, 栅格距 $\Delta x = 0.0005$ m.

选用 4 路 OAM 态信号复用传输, 方位角指数分别取 $l = 4, 8, -8, 16$, 大气湍流由 5 个等间距的随机相位屏构成, 相邻相位屏距离 $\Delta Z = 50$ m, 大气湍流折射率结构常量 $C_n^2 = 5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$. 图 2(a) 为各参量设置下由式(8)获得的随机相位屏; 图 2(b) 为发送端四路 OAM 态复用光强; 图 2(c) 为发送端四路 OAM 态复用叠加相位; 图 2(d) 和图 2(e) 分别是 OAM 态复用光束通过大气湍流传输 250 m 后的复用光强和叠加相位.

由图 2 看出,受 $C_n^2=5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 的大气湍流影响, OAM 态复用光强和叠加相位发生很大失真.

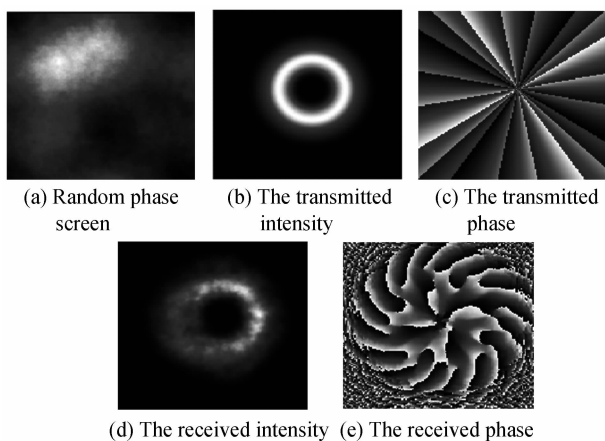


图 2 OAM 态复用光束受大气湍流影响仿真
Fig. 2 The effect of atmospheric turbulence on OAM-multiplexed beam

图 3 为有无大气湍流下,接收端解复用信号功率谱. 设定 16QAM 信号传输速率为 4Gb/s, 经过方位角指数 $l=4, 8, -8, 16$ 的 4 路 OAM 态复用, 传输速率为 16 Gb/s, 仿真得出接收端 OAM 态解复用信号功率谱, 由此计算 OAM 态复用系统频带利用率. 图 3(a) 为没有大气湍流时, 接收端方位角指数 $l=4$ 的 OAM 态解复用信号功率谱, 由图 3(a) 得 OAM 态复用系统带宽为 0.977 GHz, 因此频带利用率约为 16.38 b/s. Hz, 第一旁瓣与主瓣峰值相差 8 dB, 带外衰减明显; 图 3(b) 为 $C_n^2=1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 时, 用 10 个等间距的随机相

位屏仿真大气湍流传输 1 000 m, 接收端方位角指数 $l=4$ 的 OAM 态解复用信号功率谱, 由图 3(b) 看出, 受 $C_n^2=1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 的大气湍流影响, 主瓣峰值衰减 4.6 dB, 第一旁瓣与主瓣峰值相差 3.8 dB, 接收信号功率谱带外衰减不明显.

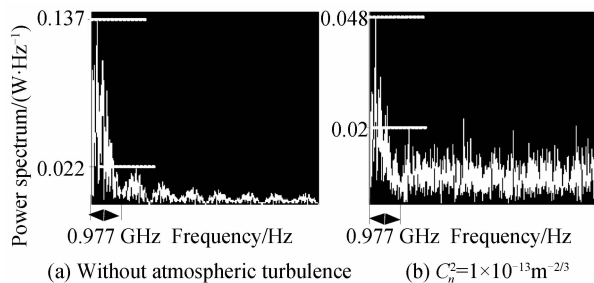


图 3 有无大气湍流 OAM 态解复用信号功率谱
Fig. 3 The signal power spectrum of OAM-demultiplexed system with/without atmospheric turbulence

图 4 为 16QAM 信号受大气湍流影响的星座图. 发送端经过方位角指数 $l=4, 8, -8, 16$ 的 4 路 OAM 态复用传输. 图 4(a) 为发送端没有经过 OAM 态转换的 16QAM 信号星座图; 图 4(b) 为 $C_n^2=5 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$, 用 10 个等间距随机相位屏仿真大气湍流传输 1000 米, 接收端方位角指数 $l=4$ 的 OAM 态解复用的 16QAM 星座图. 由图 4(b) 看出, 星座图对应的某些点位置发生少许偏移. 图 4(c) 为 $C_n^2=5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, 用 10 个等间距随机相位屏仿真大气湍流传输 1000 米, 接收端方位角指数 $l=4$ 的 OAM 态解复用的 16QAM 星座图. 由图 4(c) 看出, 星座图对应点位置发生很大偏移, 基本不

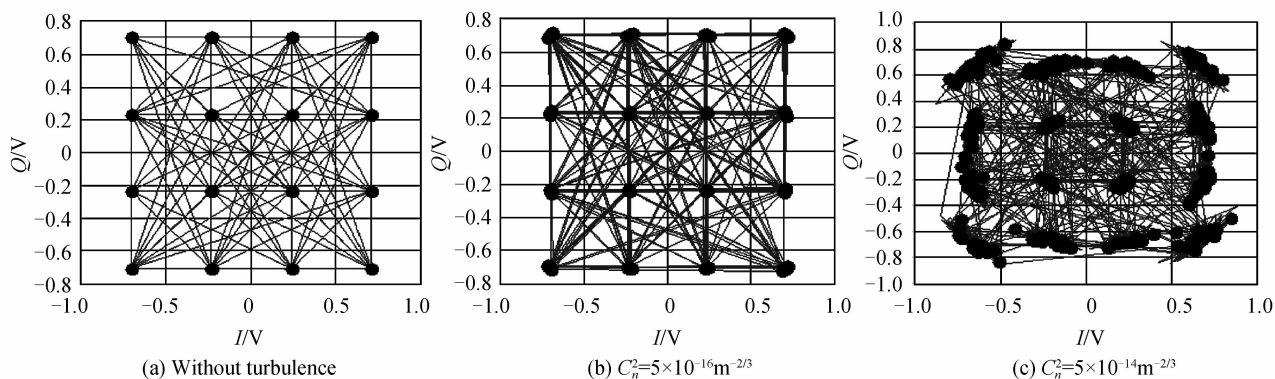


图 4 16QAM 信号受大气湍流影响星座图
Fig. 4 Effects of 16QAM constellations under atmospheric turbulence

在原来对应位置了.

图 5 为 OAM 态方位角指数分别取 $l=4, 8, -8, 16$ 的 OAM 态复用系统归一化接收功率随 C_n^2 变化仿真. 仿真过程由四路基带信号首先经过 16 QAM 调制, 传输信道用 10 个随机相位屏模拟大气湍流, 传输 1 000 m, 在接收端利用 OAM 的正交性, 用式(5)进行 OAM 解复用. 由于受大气湍流影响, 接收端 OAM 解复用信号平均功率发生丢失, 用图 1 中接收端 16 QAM 解调框图的输入信号功率与发送端对应该路

的 16QAM 调制框图的输出信号功率比值定义为归一化接收功率, 仿真实接收端每一路解复用信号归一化接收功率随大气湍流折射率结构常量 C_n^2 的变化. 由图 5 看出, 随着 C_n^2 的增大, 归一化接收功率下降. 同时, 从 OAM 复用角度分析, 方位角指数 l 越大, 受大气湍流影响越大. 当 $C_n^2 > 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 时, 归一化接收功率迅速下降, $C_n^2 = 5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 时, 归一化接收功率降到 0.2 以下.

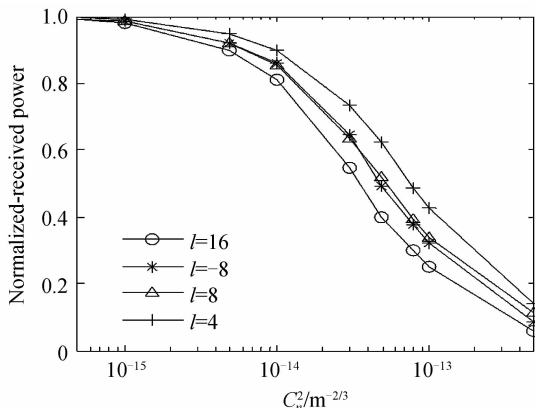


图5 系统归一化接收功率随 C_n^2 变化仿真

Fig. 5 The performance of normalized-received power against the constant C_n^2

图6为方位角指数分别取 $l=4, 8, -8, 16$ 的 OAM 态复用系统归一化接收功率随传输距离变化仿真图. 仿真条件为 $C_n^2 = 5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, 在不同传输距离下, 加入不同数量的随机相位屏, 以满足随着传输距离增大湍流影响变大情形. 随机相位屏数仿真设定为传输 50~500 m 范围用 5 个, 传输 500~1 000 m 范围用 10 个, 传输 1 000~5 000 m 范围用 20 个, 传输 5 000~10 000 m 范围用 30 个. 由图 6 看出, 随着传输距离增加, 归一化接收功率下降, 并且 l 值越大, 受传输距离影响越大, 当传输距离增大到 500 m 以上, 归一化接收功率下降很快, 当传输距离达到 10 000 m 时, 归一化接收功率降到 0.3 以下.

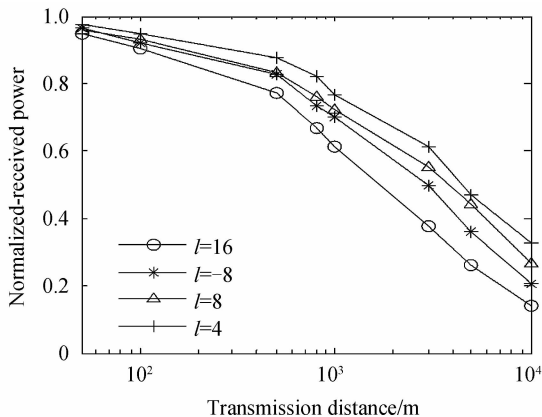


图6 系统归一化接收功率随传输距离变化

Fig. 6 The normalized-received power against transmission distance

图7为方位角指数分别取 $l=4, 8, -8, 16$ 的 OAM 态复用系统和 $l=4, 2, -1, 1$ 的 OAM 态复用系统误码率随 C_n^2 变化性能比较仿真图. 仿真条件如图 5 所述. 由图 7 看出, 在等同 C_n^2 下, $l=4, 2, -1, 1$ 的 OAM 态复用系统误码率比 $l=4, 8, -8, 16$ 的 OAM 态复用系统误码率性能差. 这是由于 $l=4, 2, -1, 1$ 的四个 l 取值越接近, 各路光环靠得比较近, 相互受临近 l 值的串扰比较大. 再单独分析单个 OAM 态复用系

统, 系统误码率都随着 C_n^2 的增大而变大, 性能下降; 从 OAM 态方位角指数取值分析, 都是 l 取值越大, 受大气湍流的影响越大, 因为 l 取值越大, 光束扩散, 导致很大的光强分布失真, 从而误码率越高. 当 $C_n^2 \geq 8 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 时, 两系统性能都很差, 区别不大, 当 $C_n^2 = 5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 时, 误码率都在 0.3 以上.

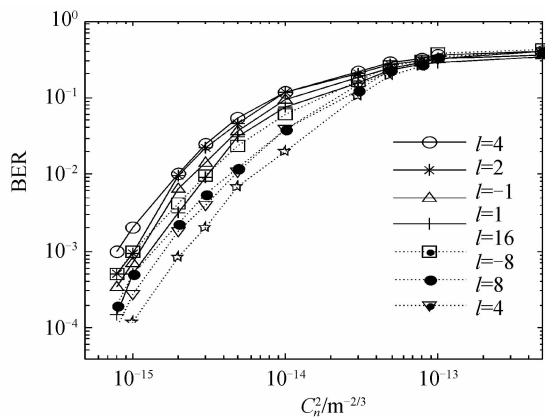


图7 $l=4, 8, -8, 16$ 和 $l=4, 2, -1, 1$ 的两个系统误码率随 C_n^2 变化性能比较

Fig. 7 The comparison of the BER performance between two systems with azimuthal index $l=4, 8, -8, 16$ and $l=4, 2, -1, 1$ against the constant C_n^2

图8为方位角指数分别取 $l=4, 8, -8, 16$ 的 OAM 态复用系统误码率随传输距离变化. 仿真条件同图 6. 由图 8 看出, 随着传输距离的增加, 误码率迅速升高, 并且 l 取值越大, 误码率性能越差. 当传输距离达到 10 000 m 时, 误码率达到 0.35 以上.

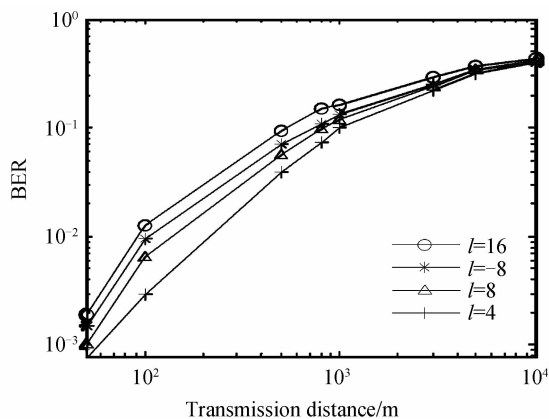


图8 系统误码率随传输距离变化

Fig. 8 The BER performance against transmission distance

以文献[2]中图 4(d1)和图 4(d2)实验结果作为参考, 不考虑极化情况, 在加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN) 信道下, 仿真 4 路 OAM 复用信号的接收误码率受大气湍流的影响. 图 9 为有无大气湍流下, 方位角指数分别为 $l=4, 8, -8, 16$ 的 OAM 态复用系统接收误码率随光学信噪比 (Optical Signal-to-Noise Ratio, OSNR) 变化仿真图. 仿真条件为 $C_n^2 = 5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, 用 10 个随机相位屏仿真

大气湍流传输 1 000 m. 由图 9 看出没有大气湍流时, l 取值大小对系统误码率性能影响不大, 误码率随 OSNR 的增大而迅速下降. 在 $C_n^o = 5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 大气湍流下, 误码率性能明显下降, 差了 2~3 个数量级. 同时, l 取值越大, 误码率越大.

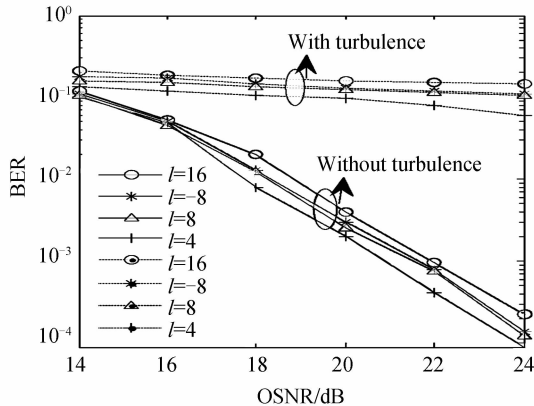


图 9 有无大气湍流的系统误码率随 OSNR 变化

Fig. 9 The BER performance against OSNR with/without atmospheric turbulence

3 结论

本文通过数值仿真分析了大气湍流对 OAM 态复用系统通信性能的影响. 改变大气湍流折射率结构常量 C_n^o 和传输距离 z , 分析其对 OAM 态复用系统的影响; 同时, 改变 OAM 态方位角指数 l , 分析不同 l 取值的 OAM 态复用系统受大气湍流的影响; 并且在信道中加入高斯噪音, 分析在有无大气湍流下误码率随 OSNR 的影响. 结果表明, 随着 C_n^o 的增加, 归一化接收功率随之下降, 误码率增大; 随传输距离增大, 归一化接收功率随之下降, 误码率增大; l 取值越接近, 系统受大气湍流影响越大; 在 AWGN 信道下, 有大气湍流, 误码率性能要降低 2 至 3 个数量级. 在 FSO 通信中, 大气湍流是影响其通信性能的主要因素, 因此, 如何降低大气湍流对 FSO 通信的影响, 尤其是对 OAM 态复用系统的影响, 将成为接下来研究的重点.

参考文献

[1] TORRES J P. Optical communications; multiplexing twisted light[J]. *Nature Photonics*, 2012, **6** (7): 420-422.
 [2] 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.
 [3] GIBSON G, COURTIAL J, PADGETT M J. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2004, **12** (22): 5448-5456.
 [4] MARTELLI P, GATTO A, BOFFI P, *et al.* Free-space optical transmission with orbital angular momentum division multiplexing[J]. *Electronics letters*, 2011, **47** (17): 972-973.
 [5] KARIMI E, MARRUCCI L, LISIO C de, *et al.* Time-division multiplexing of the orbital angular momentum of light[J].

Optics Letters, 2012, **37** (1): 127-129.

[6] HUANG H, REN Y X, YAN Y, *et al.* Performance analysis of spectrally efficient free-space data link using spatially multiplexed orbital angular momentum beams [C]. SPIE, 2013, **8647**: 1-6.
 [7] ZHAO Z J, LIAO R, LYKE S D, *et al.* Direct detection free-space optical communications through atmospheric turbulence [C]. Aerospace Conference, 2010 IEEE, 2010: 1-9.
 [8] JING Wen-bo, ZHAO Si, FU Qiang, *et al.* Turbulence characteristics optical test contrast[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41** (7): 805-811.
 景文博, 赵思, 付强, 等. 湍流特性光学测试对比[J]. *光子学报*, 2012, **41** (7): 805-811.
 [9] LIU Yun-qing, JIANG Hui-lin, TONG Shou-feng. Stabilizational tracking technology for atmospheric laser communication system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40** (7): 972-977.
 刘云清, 姜会林, 佟首峰. 大气激光通信中稳定跟踪技术研究[J]. *光子学报*, 2011, **40** (7): 972-977.
 [10] DING Ying, TONG Shou-feng, DONG Ke-yan, *et al.* Study and simulation of atmospheric UV communication performance with vertical transmitter-receiver [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39** (10): 1851-1856.
 丁莹, 佟首峰, 董科研, 等. 大气信道对垂直收发模式紫外光散射通信性能影响的仿真[J]. *光子学报*, 2010, **39** (10): 1851-1856.
 [11] ANGUITA J A, NEIFELD M A, VASIC B V. Modeling channel interference in an orbital angular momentum-multiplexed laser link[C]. SPIE, 2009, **7464**: 0U1-6.
 [12] MALIK M, O' SULLIVAN M, RODENBURG B, *et al.* Influence of atmospheric turbulence on optical communications using orbital angular momentum for encoding [J]. *Optics Express*, 2012, **20** (12): 13195-13200.
 [13] RODENBURG B, LAVERY M P J, MALIK M, *et al.* Influence of atmospheric turbulence on states of light carrying orbital angular momentum [J]. *Optics Letters*, 2012, **37** (17): 3735-3737.
 [14] REN Y X, HUANG H, XIE G D, *et al.* Atmospheric turbulence effects on the performance of a free space optical link employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2013, **38** (20): 4062-4065.
 [15] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, **45** (11): 8185-8189.
 [16] 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.
 [17] STRASBURG J D, HARPER W W. Impact of atmospheric turbulence on beam propagation[C]. SPIE, 2004, **5413**: 93-102.
 [18] ANDREWS L C. Laser beam propagation through random media[M]. Phillips R L. 2nd ed. Bellingham, Washington: SPIE press, 2005: 57-74.
 [19] BELMONTE A. Feasibility study for the simulation of beam propagation; consideration of coherent lidar performance[J]. *Applied Optics*, 2000, **39** (30): 5426-5445.