

OFDM-OAM 光信号在大气湍流中的传输

刘旻雯^{1,2}, 李迎春^{1,2*}

¹上海先进通信与数据科学研究院, 上海 200444;

²上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444

摘要 在自由空间传输的过程中,轨道角动量(OAM)光束会受到大气湍流的影响,其螺旋相位会产生畸变,导致解调后的信号质量下降。为了研究不同湍流条件下大气湍流对正交频分复用(OFDM)-OAM 光信号的影响,使用 non-Kolmogorov 湍流模型,通过改变模型中折射率结构常数 C_n^2 和大气指数 α 模拟不同情况下的大气湍流,测试 OAM 光信号经过湍流模型后的解调高斯光强图样、光束强度以及其携带的 OFDM-16QAM 信号的误码率。实验结果表明:non-Kolmogorov 湍流模型中 C_n^2 和 α 的改变会对解调后的高斯光束以及探测到的 OFDM 信号产生一定的影响,而在发送端进行信道编码可以从一定程度上改善湍流对传输信号的影响。

关键词 光通信;自由空间光通信;轨道角动量;大气湍流;正交频分复用技术;信道编码

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0706002

Propagation of OFDM-OAM Optical Signal in Atmospheric Turbulence

Liu Minwen^{1,2}, Li Yingchun^{1,2*}

¹Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Shanghai 200444, China;

²Key Laboratory of Specialty Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract In free space, an orbital angular momentum (OAM) beam can be affected by atmospheric turbulence, which distorts the beam's spiral phase and degrades the signal quality after demodulation. To study the effects of different conditions of atmospheric turbulence on orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)-OAM optical signals, a non-Kolmogorov turbulence model is used to simulate atmospheric turbulence by varying the refractive-index structure constant C_n^2 and atmospheric index α . The intensity profile of a demodulated Gauss beam as well as the light intensity and bit error rate of an OFDM-16QAM signal carried by an OAM beam are tested experimentally. Variations of C_n^2 and α affect the Gauss beam and the detected OFDM signal while channel coding reduces the effect of turbulence to some extent.

Key words optical communications; free-space optical communications; orbital angular momentum; atmospheric turbulence; orthogonal frequency division multiplexing; channel coding

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 050.4865

1 引 言

自 1992 年 Allen 等提出光的轨道角动量(OAM)以来,携带 OAM 的涡旋光束受到人们的广泛关注,尤其在发现可以通过对 OAM 进行调制来传递信息之后,利用 OAM 进行自由空间光通信(FSO)、光纤通信以及无线通信掀起了世界性的研究热潮^[1]。OAM 光束具有螺旋相位结构,其携带相位因子 $\exp(il\theta)$,其中 θ 为方位角, l 为拓扑荷数,

拥有不同拓扑荷数的 OAM 光具有不同的 OAM 模式,当 l 取整数时,光束的相位呈现连续变化,此时光可以在空间中稳定传输^[2-3]。OAM 为光通信提供了不同于频率、偏振、幅度、时间等自由度的新的信息传递方式^[4]。利用 OAM 模式内在的正交性,将多路信号调制在不同的 OAM 模式上以实现 OAM 复用,根据模式的不同可以区分不同的信道^[5]。王健等^[6-7]已成功将 OAM 与偏振等自由度相结合来进行复用通信,使得自由空间光通信系统

收稿日期: 2019-01-25; 修回日期: 2019-03-21; 录用日期: 2019-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(61601279, 61601277, 61420106011, 61635006)、上海市科学发展基金(17010500400, 16511104100, 18511103400, 15530500600, 16YF1403900)

* E-mail: liyingchun@shu.edu.cn

容量达到 1.036 Pbit/s,从而有利于未来大容量光通信的实现。

大气湍流是大气中的随机运动,可引起大气折射率的不规则变化^[8]。在自由空间中,OAM 光束的传输不可避免地受到大气湍流(AT)的影响,导致其所拥有的螺旋波前相位产生畸变^[9-10],引起 OAM 模式的功率衰落以及 OAM 复用通信中不同 OAM 信道间的信道串扰,降低 OAM 通信链路的质量^[11-12]。目前,关于 OAM 光信号在湍流中传输的大部分研究主要基于 Kolmogorov 湍流模型,在实际情况中,Kolmogorov 湍流模型适用于大气边界层,而在大气对流层和平流层的湍流功率谱大气幂指数分别为 $-10/3$ 和 -5 ,与 Kolmogorov 功率谱的 $-11/3$ 幂指数不相符,且在同一高度,大气指数也会有所波动,Kolmogorov 湍流模型此时不再适用^[13-14]。为了研究不同湍流情况下 OAM 信号的变化,本文实验中使用了 non-Kolmogorov 湍流模型,分析了不同的折射率结构常数 C_n^2 和大气指数 α 对解调后的高斯光束以及信号的影响。为了提高频带利用率,减小码间干扰,实验中采用正交频分复用—正交振幅调制(OFDN)-16QAM 信号进行通信,并利用信道编码纠正信号传输过程中的突发错误。

2 non-Kolmogorov 大气湍流模型

non-Kolmogorov 大气湍流模型具有可变的 α 值,该模型的功率谱函数包括 non-Kolmogorov 谱、广义 von Karman 谱、广义指数谱等^[15-16],使用基于广义 von Karman 谱的 non-Kolmogorov 模型,其功率谱密度函数为

$$\Phi_n(k_r, z) = A(\alpha)\tilde{C}_n^2(\alpha, z)(k_r^2 + k_0^2)^{-\frac{\alpha}{2}} \exp\left(-\frac{k_r^2}{k_l^2}\right), \quad (1)$$

$$0 \leq k_r < \infty, 3 < \alpha < 5,$$

$$\text{式中: } k_l = \frac{c(\alpha)}{l_0}, c(\alpha) = \left\{ \Gamma\left[\frac{(5-\alpha)}{2}\right] A(\alpha) 2\pi/3 \right\}^{1/(\alpha-5)},$$

$\Gamma(\cdot)$ 代表 Gamma 函数;等效结构常数 $\tilde{C}_n^2(\alpha, z) = L_0^{\frac{11}{3}-\alpha} C_n^2(z)$,单位为 $m^{3-\alpha}$,其中 z 为传输距离; $C_n^2(z)$ 为折射率结构常数,幂指数 α 为广义大气指数,一致性函数 $A(\alpha) = \Gamma(\alpha-1) \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)/(4\pi^2)$;波数 $k_r = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$, k_x, k_y 为空间波数,单位为 m^{-1} ; $k_0 = 2\pi/L_0$, L_0 为湍流外尺寸。

由上述功率谱函数可知,若湍流的内外尺寸保持不变,湍流的能量分布与 α 和 C_n^2 有关,针对 non-

Kolmogorov 湍流模型的这两个因素对自由空间 OAM 光信号传输的影响进行讨论。为方便进行实验,将接收端的螺旋相位图模拟经过大气湍流模型,使生成的扭曲螺旋相位图带有相应的湍流信息,将其加载在涡旋光的解调 SLM 上,与纯净的 OAM 光相互作用,得到相应的解调高斯光束。将携带不同的 α 或 C_n^2 的 non-Kolmogorov 湍流信息加载在接收端螺旋相位上,测试不同湍流信道条件下的光信号的特性。

3 OFDM-OAM 自由空间光通信实验系统

为了研究 non-Kolmogorov 湍流模型对 OAM 光束的解调光束及其携带的 OFDM 信号的影响,搭建了 OAM-FSO 实验传输平台,如图 1(a)所示,主要由三个部分构成:信号发送端、信号传输部分和信号接收端。在信号发送端,任意波形发生器(AWG)生成一路 OFDM-16QAM 电信号,OFDM 信号经过低通滤波器(LPF)以及分布反馈激光器(DFB)后,生成波长为 1550 nm 的高斯光信号,该高斯光束通过保偏光纤(PMF)以及准直器(Col)后进入自由空间,入射至空间光调制器(SLM),SLM 上加载了图 1(b)所示的叉形光栅,将高斯光束转换成 OAM +1 模式的拉盖尔-高斯光束(LG)。短距离传输后,OAM 光束通过焦距 f 为 15 cm 的凸透镜聚焦到解调 SLM 中心处,解调 SLM 加载的图 1(c)所示的扭曲螺旋相位图将部分 OAM 光解调为高斯光束,该解调高斯光束通过 Col 进入标准单模光纤,在信号接收端,利用光电二极管(PINs)对接收到的高斯光信号进行强度调制直接检测(IM-DD),并用数字存储示波器(DSO)记录数据,用作离线处理。

在图 1 所示的系统框图中,OFDM 信号发送端和接收端的数据处理过程如图 2 所示。在 OFDM 信号发送端,将伪随机二进制序列(PRBS)经过 Turbo 或 BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) (15,5,3)编码后进行 16QAM 映射,并利用厄米对称和 64 点快速傅里叶逆变换(IFFT)产生实数序列,为其添加循环前缀(CP)和训练序列(TS)以构成时域 OFDM 帧信号,其相关系数设置如表 1 所示。在接收端,离线 OFDM 数据经过符号同步、去除循环前缀、64 点快速傅里叶变换(FFT)、信道均衡、解映射后,对其进行 Turbo 或 BCH 译码,计算其比特误码率(BER)。

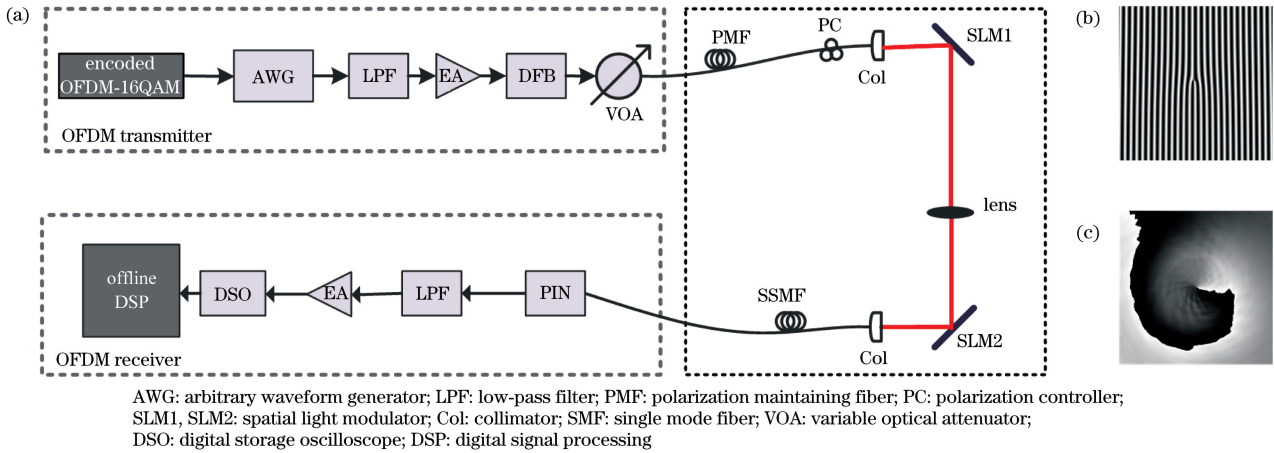


图 1 OFDM-OAM-FSO 系统示意图。(a) 系统结构图; (b) 叉形光栅图; (c) 扭曲的螺旋相位图
Fig. 1 Diagram of OFDM-OAM-FSO system. (a) System structure; (b) forked grating; (c) distorted spiral phase

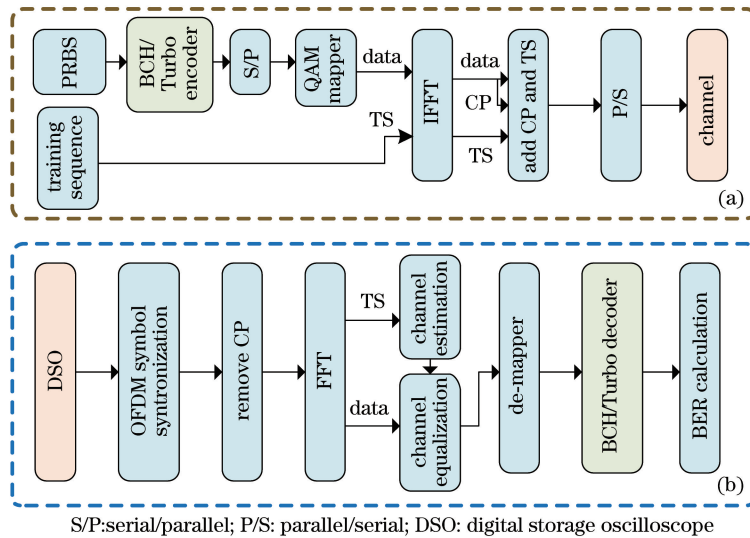


图 2 OFDM 数据处理过程。(a) 发送端 OFDM 生成过程; (b) 接收端 OFDM 处理过程
Fig. 2 Processing of OFDM. (a) Generation of OFDM at transmitter; (b) processing of OFDM at receiver

表 1 OFDM 参数

Table 1 OFDM parameters

Parameter	Value
Formulation format	16QAM
PRBS order	21
IFFT/FFT point number	64
Effective subcarriers	2-29
Length of cycle prefix	8
AWG sampling rate / (GS·s ⁻¹)	2
OSC sampling rate / (GS·s ⁻¹)	2
Detector bandwidth / GHz	1
Data rate / (Gbit·s ⁻¹)	2.93
Code rate	1/3

在信道编码过程中,通过增加冗余比特,对传输的比特流进行检、纠错,以提高系统可靠性。BCH

码是一种分组码,文中使用的 BCH 码码长为 15,信息位为 5,可纠正 3 个随机独立错误,接收端采用 Peterson 译码算法求解错误位置多项式系数,以纠正误码。Turbo 码是一种系统卷积码, Turbo 编码采用并行级联卷积码 (PCCC) 编码器结构,如图 3(a)所示,分组交织长度为 2986, Turbo 译码器结构较为复杂,如图 3(b)所示,分量译码器 1 或分量译码器 2 先后利用信息序列 $\mathbf{y}^{(s)}$ 和校验序列 $\mathbf{y}^{(p)}$,采用 Max-Log-Map 译码算法计算出后验概率 $L(\hat{\mathbf{u}}_k)$,该值减去信道信息 $L_c \mathbf{y}_k^{(s)}$ 和先验值 $L(\mathbf{u}_k)$ 后得到的外信息 $L_e(\mathbf{u}_k)$ 经过交织器或解交织器后作为先验值 $L(\mathbf{u}_k)$ 送入另一个译码器,经过 3 次循环迭代后分量译码器 2 输出的后验概率经过解交织和硬判决得到原始信息序列,其中 \mathbf{u}_k 为原始第 k 个信息位, $\hat{\mathbf{u}}_k$ 为估计出的第 k 个信息位。

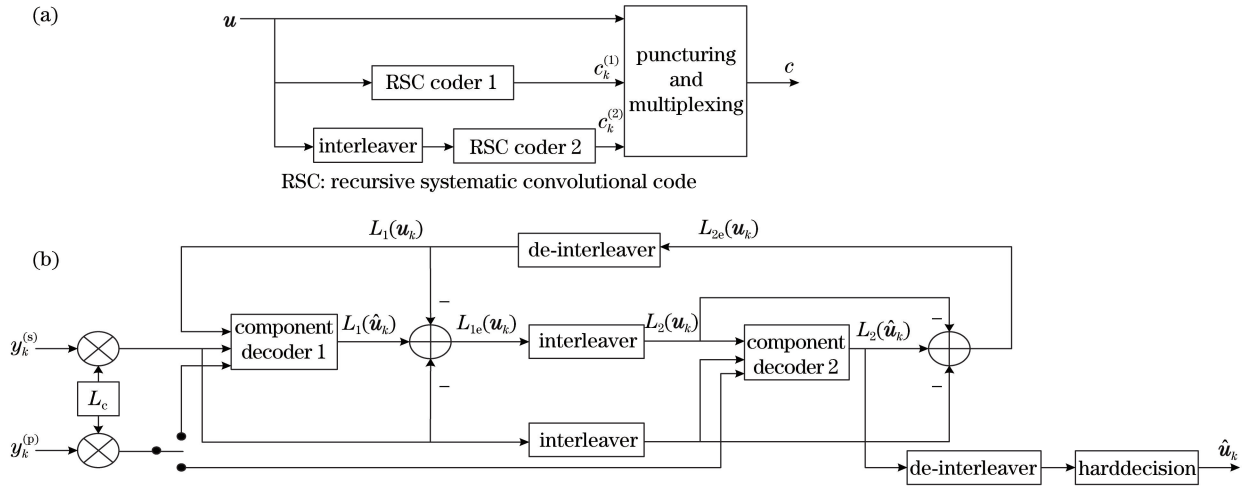


图 3 Turbo 码编译过程。(a) Turbo 编码器结构;(b) Turbo 译码器结构

Fig. 3 Turbo code/decode processing. (a) Structure of Turbo coder; (b) structure of Turbo decoder

4 经过大气湍流扰动后的 OFDM-OAM 光信号

实验中,将经过具有不同 α 、 C_n^2 值的 non-

Kolmogorov 湍流模型的螺旋相位图加载在解调 SLM 上,相应的解调高斯光强轮廓图样如图 4 所示,随着 α 的降低或 C_n^2 的增加,螺旋相位图扭曲的程度越发严重,解调后的高斯光束轮廓也越发不清晰。当 C_n^2 较大且 α 较小时,解调出的高斯点几乎不可见,接近于环状光强分布图。

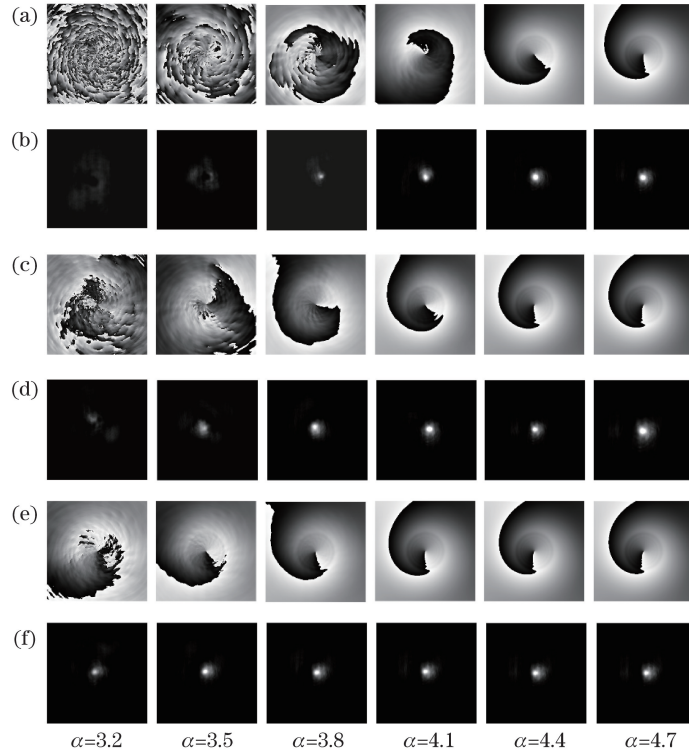


图 4 经过不同 α 值下的 non-Kolmogorov 湍流模型的相位图及相应的解调光强图。(a)(c)(e) $C_n^2 = 3 \times 10^{-13}$ 、 $C_n^2 = 4.5 \times 10^{-14}$ 、 $C_n^2 = 5 \times 10^{-15}$ 时的扭曲螺旋相位图;(b)(d)(f)对应于(a)(c)(e)的解调光强图

Fig. 4 Phase diagrams and corresponding demodulated intensity diagrams based on non-Kolmogorov turbulence model with different α . (a)(c)(e) Distorted spiral phase diagrams for $C_n^2 = 3 \times 10^{-13}$, $C_n^2 = 4.5 \times 10^{-14}$, $C_n^2 = 5 \times 10^{-15}$; (b)(d)(f) demodulated intensity diagrams corresponding to Figs. 4(a)(c)(e)

测量了相同 α 值时不同 C_n^2 条件下接收到的解调高斯光的平均光功率,如图 5 所示,其中折射率结构常数 C_n^2 的变化范围为 $5 \times 10^{-15} \sim 7 \times 10^{-13}$,大气指数 α 分别为 3.2, 3.5, 3.8, 4.1, 4.4。随着 C_n^2 的增加,接收光功率呈现逐渐下降的趋势。当 C_n^2 较小、 α 较大时,接收到的光功率较大。当 C_n^2 较大、 α 较小时,接收到的光功率很小,接近于零,对应于图 4 中所示的环状光强分布图样。当 α 为 3.2 和 3.5 时,所测范围内 C_n^2 的值对接收光功率的影响较大,而当 α 为 4.1 和 4.4 时, C_n^2 需大于 1×10^{-13} 时接收光功率才会有明显变化。

测量了 OAM+1 模式在 non-Kolmogorov 湍流模型下不同 α 值对应的平均接收光功率,如图 6(a)所示。 α 的取值范围为 3.1~4.9,图中三条曲线分别对应于 C_n^2 为 3×10^{-13} , 4.5×10^{-14} , 5×10^{-15} 的情况,随着 α 值的不断增加,接收到的光功率逐步增加至 0.46 mW 左右并保持稳定。当 $3.2 < \alpha < 4.4$, C_n^2 为 3×10^{-13} 时所对应的光功率上升速度大于 5×10^{-15} 、 4.5×10^{-14} 所对应的光功率在该幂值范围内的上升速度,表明 C_n^2 值较大时 α 值对 OAM 光束

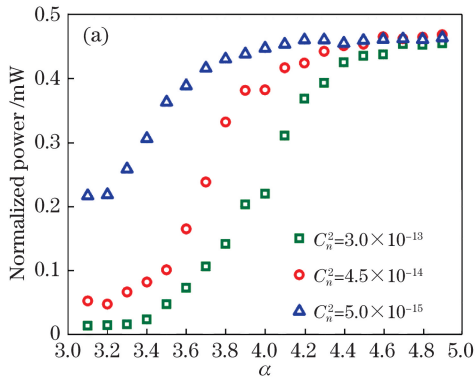


图 6 不同 α 值对应的接收光功率。(a)不同 C_n^2 条件下的接收光功率;(b)不同 OAM 模式的接收光功率

Fig. 6 Received power as a function of α . (a) Received power for different C_n^2 ;

(b) received power for different OAM modes

的影响较大,将 OFDM-16QAM 信号加载在发射端信号发生器上,测试不同湍流条件下信号的误码率特性。在 non-Kolmogorov 模型中,当 α 不变时, C_n^2 在 $5 \times 10^{-15} \sim 7 \times 10^{-13}$ 之间的比特误码率如图 7(a)所示,随着 C_n^2 的增加,接收到的 OFDM-16QAM 信号的误码率呈现出整体上升的趋势。当 $\alpha = 4.4$ 时,在所测 C_n^2 范围之内,比特误码率一直低于 1×10^{-2} ,变化较为缓慢,变化范围不超过一个数量级。当 $\alpha = 3.2$ 时, C_n^2 为 4.5×10^{-14} 时的误码率高于 1×10^{-2} ,

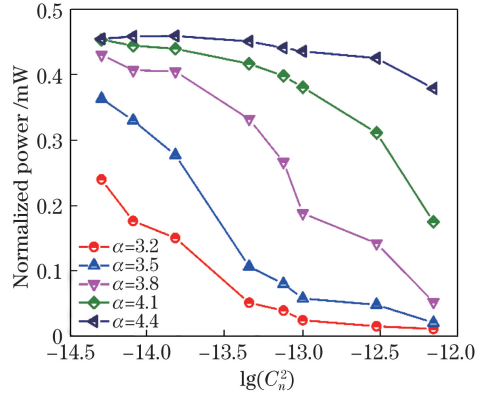
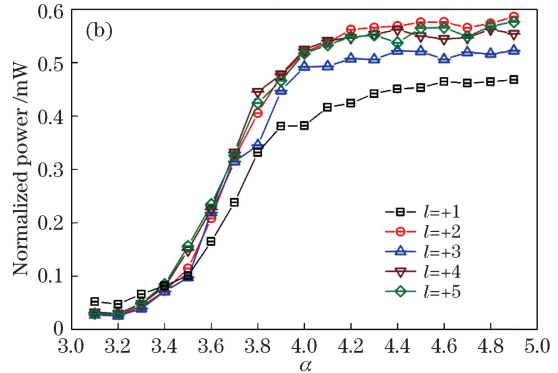


图 5 不同 C_n^2 值对应的接收光功率

Fig. 5 Received power as a function of C_n^2

的影响较大。图 6(b)显示了当 $C_n^2 = 4.5 \times 10^{-14}$, OAM 模式分别为 +1, +2, +3, +4, +5 时接收到的解调高斯光的平均光功率随着 non-Kolmogorov 湍流模型中 α 的变化情况。结果表明:对于不同的 OAM 模式,在相同折射率结构常数的情况下,随着 α 的逐渐增加,接收到的平均光功率的变化趋势大致相同。当 $\alpha < 4.4$ 时,接收光功率随着幂值的增加而增大,当 $\alpha > 4.4$ 时,接收光功率基本保持不变。



超过前向纠错(FEC)门限。图 7(b)为 C_n^2 分别为 5×10^{-15} , 4.5×10^{-14} , 3×10^{-13} 时,不同 α 值下的误码率。随着 α 值的增加,误码率逐渐下降,最终趋于稳定。当 $\alpha > 4.2$ 时,误码率几乎保持不变,维持在 2×10^{-4} 左右。当 $\alpha < 4.1$ 时,误码率的波动较大,与图 6(a)中接收光功率的变化趋势相符合。

图 8 为 $\alpha = 3.8$, C_n^2 为不同值时接收到的 OFDM 信号的星座图,当 C_n^2 为 3×10^{-13} 时其星座图杂乱不堪,星座点堆叠在一起,当 C_n^2 为 5×10^{-15} 时,星座图较为清晰,集中在 16QAM 参考点附近。

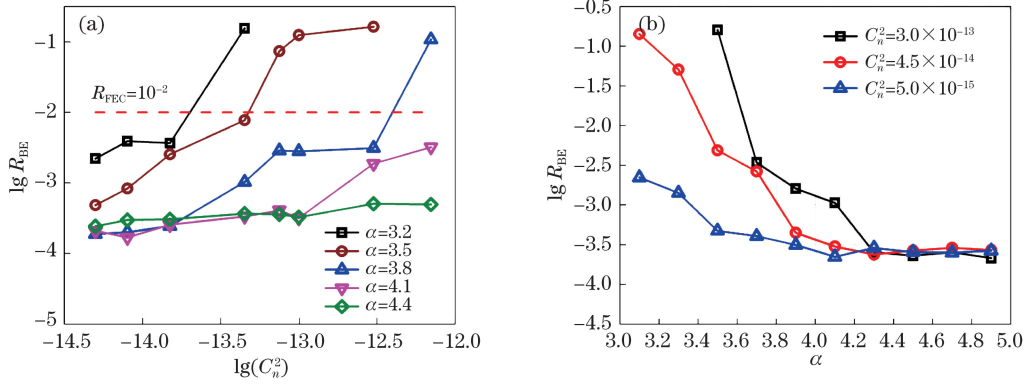


图 7 不同湍流条件下的比特误码率。(a)不同 C_n^2 值下的误码率;(b)不同 α 值下的误码率

Fig. 7 Bit error rates in different turbulence conditions. (a) Error rate as a function of C_n^2 ; (b) error rate as a function of α

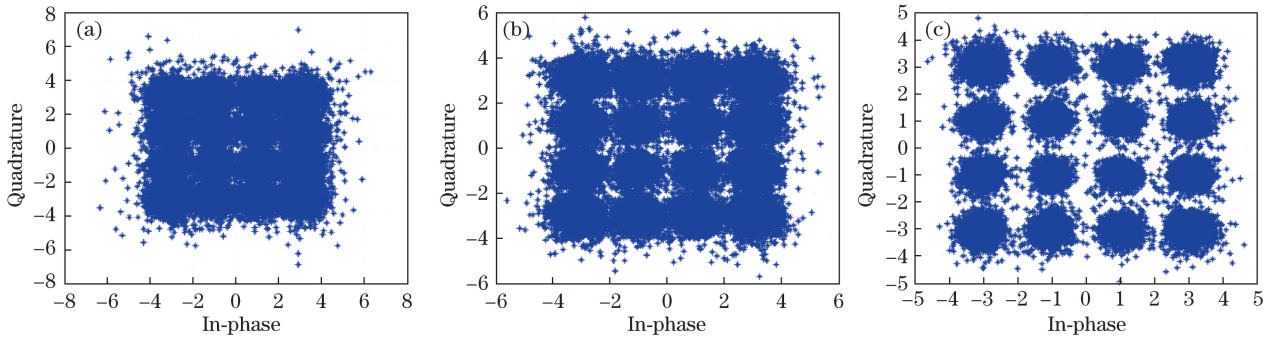


图 8 $\alpha=3.8$ 时接收信号的星座图。(a) $C_n^2=3\times 10^{-13}$; (b) $C_n^2=4.5\times 10^{-14}$; (c) $C_n^2=5\times 10^{-15}$

Fig. 8 Constellations of received signal when $\alpha=3.8$. (a) $C_n^2=3\times 10^{-13}$; (b) $C_n^2=4.5\times 10^{-14}$; (c) $C_n^2=5\times 10^{-15}$

由上述实验结果可知,湍流会对 OFDM-OAM 光信号产生影响,降低信号质量,为了减小这一影响,经过信道编码后的信号 BCH-OFDM-16QAM、Turbo-OFDM-16QAM 被加载在发送端。图 9 是 α 为 3.8 时不同接收光功率下的误码率曲线图。图 9(a)为不同 C_n^2 值对应的误码率,随着接收光功率的增加,信号的误码率逐渐降低。在所测的功率范围内,当 C_n^2 分别为 5×10^{-15} , 4.5×10^{-14} , 3×10^{-13} 时,三者的误

码率并无明显差异。图 9(b)为 $C_n^2=5\times 10^{-15}$ 时使用信道编解码前后的误码率,当接收光功率约为 -13 dBm 时,误码率处于 FEC 门限值处。经过 BCH 编解码后,误码率下降了约半个数量级,在 -15 dBm 时便可以降低到门限以下。经过 Turbo 编解码后,误码率降低得更为明显,和未编码时信号的误码率相比,其可以降低 1 至 2 个数量级,当接收光功率为 -16 dBm 时,误码率仍可保持在 FEC 门限以下。

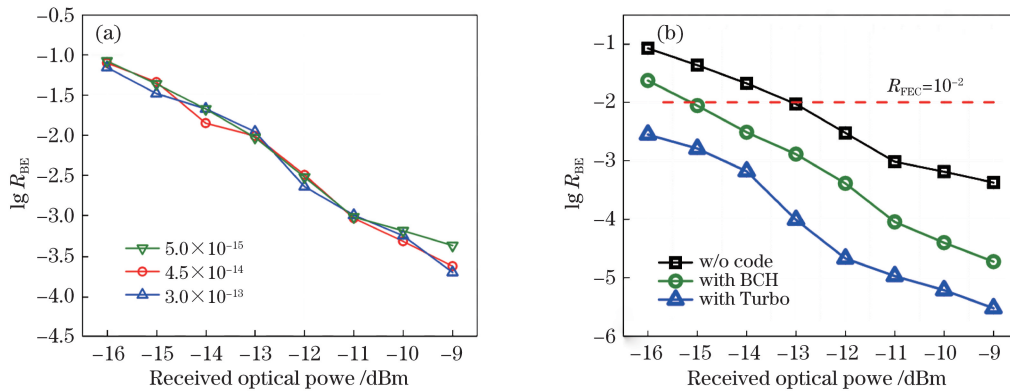
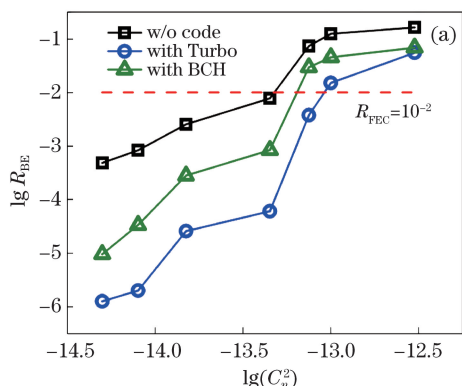


图 9 $\alpha=3.8$ 时不同接收光功率下的误码率。(a) 不同 C_n^2 值对应的误码率;(b) $C_n^2=5\times 10^{-15}$ 时使用信道编解码前后的误码率

Fig. 9 Error rates under different received powers when $\alpha=3.8$. (a) Error rates for different C_n^2 ; (b) error rates with or without channel coding when $C_n^2=5\times 10^{-15}$

图 10 为 non-Kolmogorov 模型中不同湍流情况下使用信道编解码前后 OFDM-16QAM 信号的平均误码率。图 10(a) 为 $\alpha = 3.5$ 时不同 C_n^2 值所对应的编解码前后的平均误码率。当 C_n^2 为 7.5×10^{-14} 时, Turbo 码的误码率低于 1×10^{-2} , BCH 码依旧在门限以上。当 C_n^2 低于 4.5×10^{-14} 时, Turbo 编码和 BCH 编码对信号的改善效果较为明显, BCH 编码可使原始信号的误码率下降约 1 个数量级,



Turbo 编码则可以下降约 2 个数量级。图 10(b) 为 $C_n^2 = 4.5 \times 10^{-14}$ 时, 不同 α 值所对应的平均误码率。使用 BCH 或 Turbo 编码, $\alpha = 3.3$ 处的误码率降低到 FEC 门限以下, 其中 Turbo 码的性能更明显; 当 $\alpha > 4.3$ 时, 编码前后的误码率均保持稳定, BCH 编码可使误码率维持在 10^{-5} 左右, Turbo 编码可使误码率接近于 10^{-6} 。

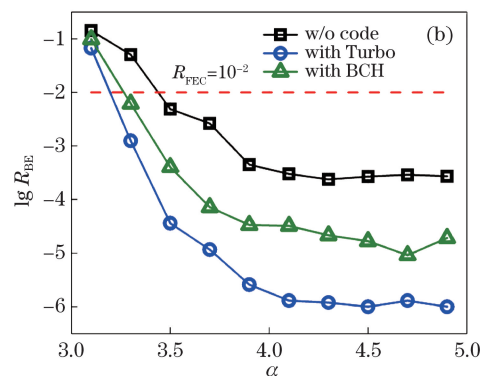


图 10 使用信道编解码前后的比特误码率。(a) 不同 C_n^2 值对应的误码率; (b) 不同 α 值对应的误码率

Fig. 10 Bit error rates with or without channel coding. (a) Error rates for different C_n^2 ; (b) error rates for different α

5 结 论

为了研究不同湍流条件对 OAM 光束以及其所携带的 OFDM-16QAM 信号的影响, 测试了 non-Kolmogorov 湍流模型中不同 C_n^2 和 α 值下的 OAM 解调光强图样、解调高斯光强度、信号误码率和星座图, 并使用 BCH 编码和 Turbo 编码对抗湍流导致的突发错误, 以提高信道可靠性。实验结果表明: C_n^2 和 α 值的改变对光强以及信号误码率都有明显的影响; 当 C_n^2 较大或 α 较小时, 解调出的光束高斯点几乎不可见, 光强较弱, OFDM 信号误码率高; 当 C_n^2 较小或 α 较大时, 解调高斯光轮廓较为明显, 光强较强, 误码率也有所下降; 当湍流对信号的影响较小时, BCH 编码和 Turbo 编码对接收的 OFDM 信号有明显的改善, 其中 Turbo 编码的性能更优, 而当湍流影响较大时, 信道编码效果不明显。

参 考 文 献

- [1] Stuart H R. Dispersive multiplexing in multimode optical fiber [J]. *Science*, 2000, 289(5477): 281-283.
- [2] Pan S X, Zhao S M, Wang L, *et al.* Experimental investigation of underwater propagation characteristics of orbital angular momentum [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0606004.

潘孙翔, 赵生妹, 王乐, 等. 水下轨道角动量态传输特性的实验研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0606004.

- [3] Shi S, Ding D S, Zhou Z Y, *et al.* Sorting of orbital angular momentum states of light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0607001.
施帅, 丁冬生, 周志远, 等. 轨道角动量光的区分 [J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0607001.
- [4] Nejad R M, Wang L X, Lin J C, *et al.* Parasitic effect of TE and TM modes in OAM-MDM transmission systems [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO): Science and Innovations 2017, May 14-19, 2017, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: SW4I.2.
- [5] Willner A E, Huang H, Yan Y, *et al.* Optical communications using orbital angular momentum beams [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(1): 66-106.
- [6] 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.
- [7] 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 [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8647: 864706.
- [8] Ke X Z, Chen J, Yang Y M. Study on orbital angular momentum of Laguerre-Gaussian beam in a slant-

- path atmospheric turbulence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(15): 150301.
- 柯熙政, 谌娟, 杨一明. 在大气湍流斜程传输中拉盖高斯光束的轨道角动量的研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(15): 150301.
- [9] Anguita J A, Neifeld M A, Vasic B V. Modeling channel interference in an orbital angular momentum-multiplexed laser link[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7464: 74640U.
- [10] Ren Y X, Xie G D, Huang H, *et al.* Adaptive optics compensation of multiple orbital angular momentum beams propagating through emulated atmospheric turbulence[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(10): 2845-2848.
- [11] 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.
- [12] Xie G D, Ren Y X, Huang H, *et al.* Phase correction for a distorted orbital angular momentum beam using a Zernike polynomials-based stochastic-parallel-gradient-descent algorithm[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1197-1200.
- [13] Wu X Q, Huang Y B, Mei H P, *et al.* Measurement of non-Kolmogorov turbulence characteristic parameter in atmospheric surface layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0601001.
- 吴晓庆, 黄印博, 梅海平, 等. 近地面层大气非Kolmogorov湍流特征参数测量[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0601001.
- [14] Zhang N N, Shan X, Zhang Y G, *et al.* Simulated experiment of the light intensity influenced by non-Kolmogorov turbulence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(6): 0601002.
- 张娜娜, 单欣, 张燕革, 等. Non-Kolmogorov湍流对光强影响的模拟实验[J]. *光子学报*, 2018, 47(6): 0601002.
- [15] Shchepakina E, Korotkova O. Second-order statistics of stochastic electromagnetic beams propagating through non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 10650-10658.
- [16] Toselli I, Andrews L C, Phillips R L, *et al.* Free-space optical system performance for laser beam propagation through non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(2): 026003.