

无线光正交频分复用系统的实验研究

柯熙政 雷思琛 李蓓蕾

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 根据正交频分复用(OFDM)基本原理构建了无线光正交频分复用(FSO-OFDM)实验系统,仿真分析了信道噪声对FSO-OFDM系统性能的影响。最后通过实验验证了信道噪声对信号星座图的影响,为FSO-OFDM的应用提供了实验依据。实验表明FSO-OFDM系统具有较好的抗码间串扰的性能,其误码率低于单载波调制系统。

关键词 光通信;无线激光通信;正交频分复用;信道噪声;星座图

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.1205003

Experimental Study on Free Space Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing System

Ke Xizheng Lei Sichen Li Beilei

College of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract A reasonable free space optical orthogonal frequency division multiplexing (FSO-OFDM) experimental system model is set up according to the principle of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM). The performance of this scheme is simulated under various channel conditions. And the impact of channel noise on OFDM modulation constellation is tested experimentally, which provides an experimental basis for FSO-OFDM. The result shows that FSO-OFDM system has better performance to restrain inter-symbol interference, and its error rate is lower than that of the single carrier modulation system.

Key words optical communications; free space laser communication; orthogonal frequency division multiplexing; channel noise; constellation

OCIS codes 060.2605; 070.1170; 010.1330

1 引 言

无线光正交频分复用技术(FSO-OFDM)是利用串/并转换将高速的串行数据流转换成低速并行的正交频分复用(OFDM)数据流,可实现高效的并行数据传输^[1-8]。FSO-OFDM系统通过插入保护间隔(GI)和循环前缀(CP)以减少符号间串扰(ISI)及子信道间干扰(ICI)。由于FSO-OFDM系统中OFDM信号在频谱上相互重叠并且正交,大大提高了系统的频谱利用率。

2001年,Sun^[9]将OFDM技术应用于FSO通信系统中;同年,You等^[10]提出了两种降低FSO-OFDM峰值平均功率比(PAPR)的方法。2003年Ohtsuki^[11]提出了在无线激光通信中采用多载波调制的概念。2006年,González等^[12]提出了一种数据速率高且不需要信道均衡的室内环境下无线光自适应OFDM系统方案;同年,Shieh等^[13]设计了基于相干检测的OFDM系统(CO-OFDM)。2007年,两种FSO-OFDM系统模型被提出^[14]。2008年,Cvijetic等^[15]在室内模拟了通信速率为10 Gb/s、传输距离为2.5 km的FSO通信实验。目前人们已经通过光OFDM实验验证了构建100 Gb/s的传输速率、2 (bit/s)/Hz的高光谱效率在单模光纤上传输1000 km的

收稿日期: 2015-07-15; 收到修改稿日期: 2015-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(61377080)、国家科技创新计划(13C26213201867)、江苏省省级前瞻性研究专项资金(第三批)项目资助(BE2013088)

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

相干光通信系统的可行性^[16]。

OFDM 技术已经广泛地应用于非对称数字用户环路、高清晰度电视、4G 网络等领域。本文搭建了 FSO-OFDM 系统,实验验证了 FSO-OFDM 系统的可行性,从理论和实验上对比分析了 FSO-OFDM 信号星座图与传统单载波无线光正交相移编码(FSO-QPSK)调制技术的信号星座图(星座图可以较为直观地看出信号的信噪比大小,星座图越集中在解调中心点位置说明信噪比越大,误码率越低)。实验结果表明 FSO-OFDM 系统对噪声具有较好的抑制能力,适合在大气湍流环境中应用。

2 系统原理

2.1 FSO-OFDM 系统

如图 1 所示,FSO-OFDM 系统包括发射端和接收端两部分。发送端由 OFDM 调制模块、电/光转换模块和光发射模块组成;接收部分由光接收模块、光/电转换模块和 OFDM 解调模块组成。OFDM 调制模块的主要功能是将数据比特变换成 OFDM 符号,产生基带时间序列信号。电/光转换模块的主要功能是将 OFDM 能量谱线性地由射频频域转变到光域,以便其适应在大气信道中传输。

OFDM 发射模块将一路高速并行数据分解为串行的 N 路低速数据,通过子载波符号映射对其进行星座映射,最后通过 N 点逆傅里叶变换(IFFT)运算器生成多载波数字 OFDM 信号。为了在相邻的 OFDM 码元部分重叠的时候还能保持子载波间的正交性,对该信号加入了循环前缀;再经过并串转换后将数据串行输入数/模转换器(DAC)生成模拟信号;最后对其进行电/光转换即加入直流偏置将相应的电信号转换为光信号发射。由于 OFDM 符号为双极性,且光强调制只能传送单极性信号,故采用直流偏置以确保 OFDM 符号的非负性。

发送的 OFDM 信号经过大气信道到接收端,接收端通过光学天线接收到 OFDM 信号,对接收到的信号进行与发射端相逆的解调过程,还原出原始发射信号。

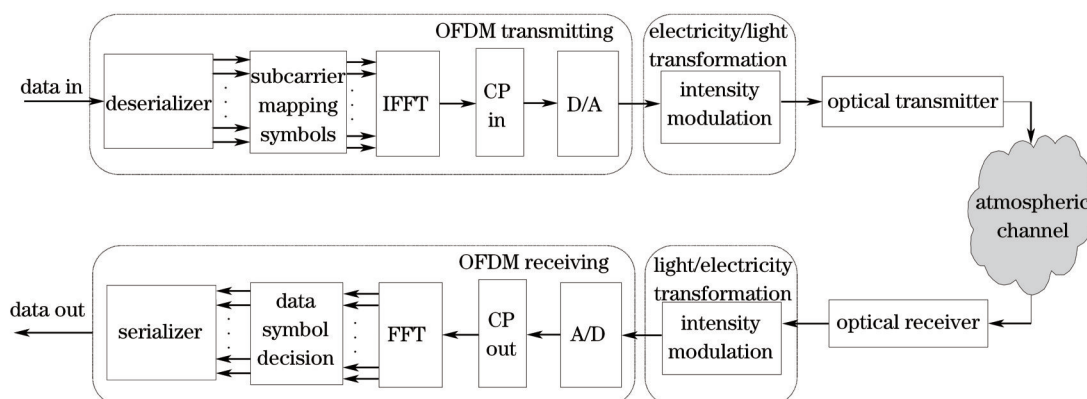


图 1 FSO-OFDM 系统模型

Fig.1 Model of FSO-OFDM system

2.2 OFDM 原理

OFDM 是多载波调制,它将发送端一路高速串行的数据流调制到多路并行的子载波中进行传输,这些子载波共享系统的带宽。OFDM 系统调制器的基本原理如图 2 所示。

如图 2 所示:在 OFDM 系统的调制中,通过串/并(S/P)转换将串行数据流变为 M 路并行子数据流,其中, a_m 代表第 m 路数据符号的同相分量, b_m 代表第 m 路数据符号的正交分量;每路子数据流分别调制到对应的子载波上; M 路调制信号合成为 OFDM 发送信号 $s(t)$ 。OFDM 的发射信号 $s(t)$ 可表示为^[17]

$$s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \text{Re}[a_m + jb_m] \exp(j2\pi f_m t) = \sum_{m=0}^{M-1} [a_m \cos(2\pi f_m t) - b_m \sin(2\pi f_m t)], \quad (1)$$

式中子载波频率 $f_m = m/T_s$, 则(1)式可以改写为

$$s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \left[a_m \cos\left(\frac{2\pi mt}{T_s}\right) - b_m \sin\left(\frac{2\pi mt}{T_s}\right) \right], \quad (2)$$

在时刻点 $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, (M-1)\Delta t$, 其中 $\Delta t = T_s/M$, 对(1)式中的 OFDM 信号 $s(t)$ 进行采样, 得到矢量 $\mathbf{s} = [s_0, s_1, \dots, s_{M-1}]^T$ (上标 T 代表转置), 则矢量 \mathbf{s} 的第 n 个元素可以表示为

$$s_n = \sum_{m=0}^{M-1} \text{Re} \left[(a_m + jb_m) \exp \left(j \frac{2\pi mn}{M} \right) \right] = \sum_{m=0}^{M-1} \left[a_m \cos \left(\frac{2\pi mn}{M} \right) - b_m \sin \left(\frac{2\pi mn}{M} \right) \right], \quad (3)$$

式中 $n = 0, 1, \dots, M-1$ 。由(3)式可知, 除了相差一个常量 $1/\sqrt{M}$, 矢量 \mathbf{s} 是对 M 个传输符号 $\{s_k = a_k + jb_k\}_{k=0}^{M-1}$ 作离散傅里叶逆变换运算(IDFT)后的实数部分, 因此, 忽略这个常系数(与传输功率有关), \mathbf{s} 中的元素可以表示为

$$s_n = \text{Re} \left[\text{IDFT}(a_0 + jb_0, a_1 + jb_1, \dots, a_{M-1} + jb_{M-1}) \right] = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=0}^{M-1} \left[a_m \cos \left(\frac{2\pi mn}{M} \right) - b_m \sin \left(\frac{2\pi mn}{M} \right) \right], n = 0, 1, \dots, M-1, \quad (4)$$

因此, OFDM 发射信号 $s(t)$ 可以通过把 \mathbf{s} 中的元素以 Δt 的时间间隔通过低通滤波器而得到^[18], 从而 OFDM 系统中的多载波调制就可以利用 IDFT 来实现。

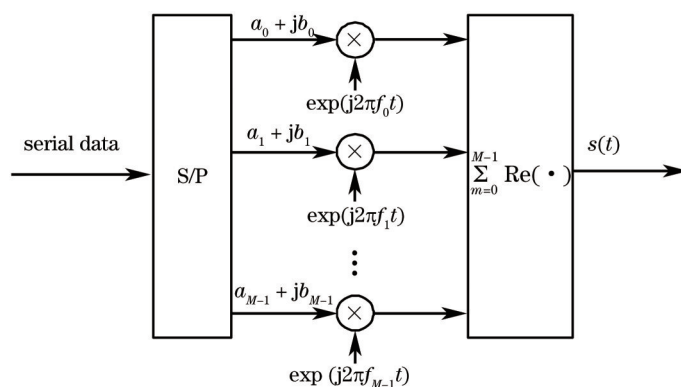


图 2 OFDM 系统调制器原理框图

Fig.2 Block diagram of the modulator for OFDM system

3 仿真分析

3.1 信道模型

大气湍流会造成信号光功率的随机起伏, 随着阴、雨、雾、霾的天气变化, 给信号带来不同程度的振幅及相位噪声。以下着重讨论大气信道对光强带来的噪声影响。假定信号为 $s(t)$, 噪声为 $n(t)$, 如果混合迭加波形是 $s(t) + n(t)$ 形式, 则称 $n(t)$ 为加性噪声; 如果迭加波形为 $s(t)m(t) + n(t)$ 形式, 则称 $m(t)$ 为乘性噪声。

加性噪声是叠加在信号上的一种噪声, 无论有无信号, 噪声 $n(t)$ 都是始终存在的。加性高斯白噪声(AWGN)是最基本的噪声与干扰模型。它的幅度分布服从高斯分布, 而功率谱密度是均匀分布的。

乘性噪声随着信号的存在而存在, 乘性噪声通过信号传输表现出来。这里采用服从 Gamma-Gamma 分布的信道模型。为了表征大气湍流强度, 引入无量纲的 Rytov 方差, 表示为

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (5)$$

式中 C_n^2 为折射率结构常数。波数 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, L 是传播距离。

将 Gamma-Gamma 分布的信道模型的光强公式分解为两个独立随机过程的乘积形式, 每一个随机过程都包含一个 Gamma 概率密度函数。因此, Gamma-Gamma 分布的信道模型可以表示为^[19]

$$f_I(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \cdot I^{(\alpha+\beta)/2-1} \cdot K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\alpha\beta I} \right), \quad I > 0, \quad (6)$$

式中 I 为光信号强度, α 和 β 为概率密度函数参数(与 σ_R^2 有关), Γ 为 Gamma 函数, $K_{\alpha-\beta}$ 为 $\alpha-\beta$ 阶的第二类修正 Bessel 函数。

将 OFDM 技术应用于 FSO 系统中, 可利用其对高速数据流进行串/并转换的特点, 使得每个子载波上的数据符号持续长度相对增加, 可以有效地减少由于无线信道所带来的码间干扰, 且各子载波之间存在正交性, 允许信道的频谱相互重叠, 可最大限度地利用频谱资源。为了证明 FSO-OFDM 系统具有良好的抑制大

气湍流带来的噪声的影响,下面对不同湍流强度和不同信噪比下 Gamma-Gamma 信道中 FSO-OFDM 系统和 FSO-QPSK 系统的信号星座图进行对比分析。分两种情况讨论:1) Gamma-Gamma 信道下乘性噪声对信号星座图的影响;2) Gamma-Gamma 信道下乘性噪声与加性高斯白噪声共同作用对信号星座图的影响。

3.2 乘性噪声

分析 32 子带 OFDM 调制[其中每个子带都是正交相移键控(QPSK)调制]与单载波 QPSK 调制对接收端解调信号星座图在 Gamma-Gamma 分布大气湍流信道模型(包括弱、中、强湍流特性下)的特性。

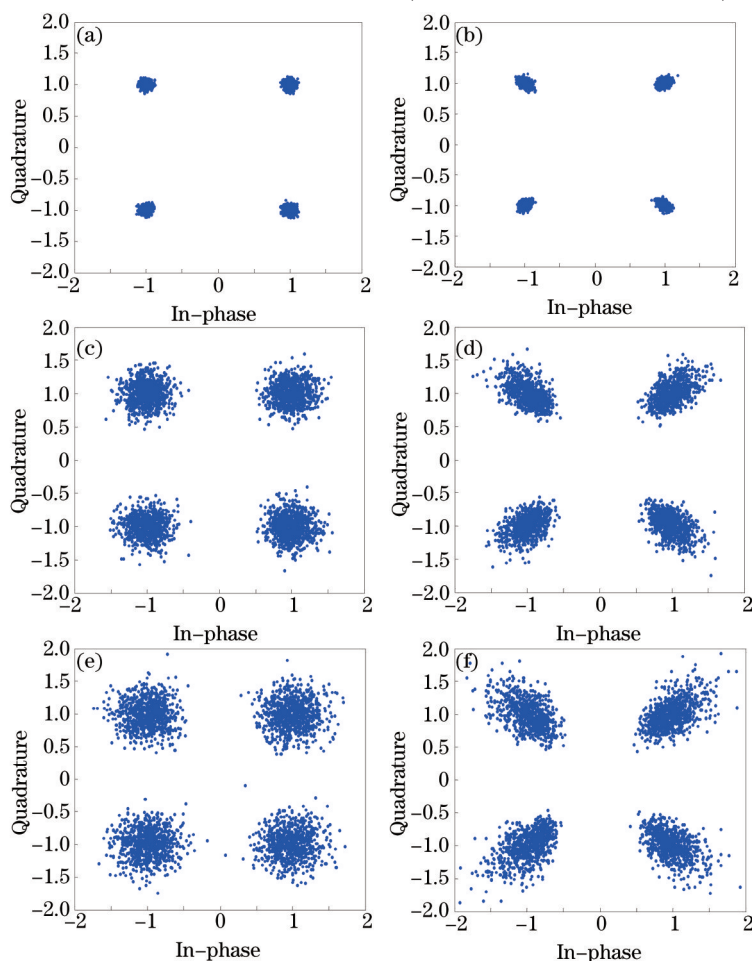


图3 乘性噪声影响下,OFDM 和单载波 QPSK 解调信号的星座图

Fig.3 Constellation diagrams of OFDM signal and QPSK signal by influence of multiplicative noise

当 $\sigma_r = 0.2$ 时弱湍流情况下 OFDM 调制和单载波 QPSK 调制下接收端解调信号的星座图分别如图 3(a)、(b)所示;在 $\sigma_r = 1$ 的中湍流情况下,OFDM 调制和单载波 QPSK 调制下接收端解调信号的星座图分别如图 3(c)、(d)所示;在 $\sigma_r = 2$ 的强湍流情况下,OFDM 调制和单载波 QPSK 调制下接收端解调信号的星座图分别如图 3(e)、(f)所示。从图 3(b)中可以看出,调制信号受到乘性噪声的影响后,单载波 QPSK 解调信号的星座图表现为沿径向扩展。图 3(a)是 OFDM 解调信号的星座图,图中星座图的相位清晰可见。

对比图 3 所有仿真结果,可以看出湍流强度越强,单载波 QPSK 解调信号的星座图沿径向扩展越严重。采用 OFDM 解调信号的星座图收敛性能明显较好,其星座点分布服从二维高斯分布。可以看出在弱湍流下 OFDM 信号的星座图收敛状态最好,中湍流和强湍流相比弱湍流 OFDM 信号的星座图较为分散。

3.3 混合噪声

考虑 Gamma-Gamma 分布大气湍流和高斯白噪声共同作用的混合噪声信道模型下,分析采用 32 子带 OFDM 调制(其中每个子带都是 QPSK 调制)和单载波 QPSK 调制对接收端解调信号星座图的影响。设定加性噪声信噪比 $R_{SN} = 0$,当 $\sigma_r = 0.2$ 时,OFDM 调制和单载波 QPSK 调制下接收端解调信号的星座图分别如图 4(a)、(b)所示;当 $\sigma_r = 1$ 时,OFDM 调制和单载波 QPSK 调制下接收端解调信号的星座图分别如图 4(c)、(d)所

示;当 $\sigma_r = 2$ 时,OFDM 调制和单载波 QPSK 调制下接收端解调信号的星座图分别如图 4(e)、(f)所示。

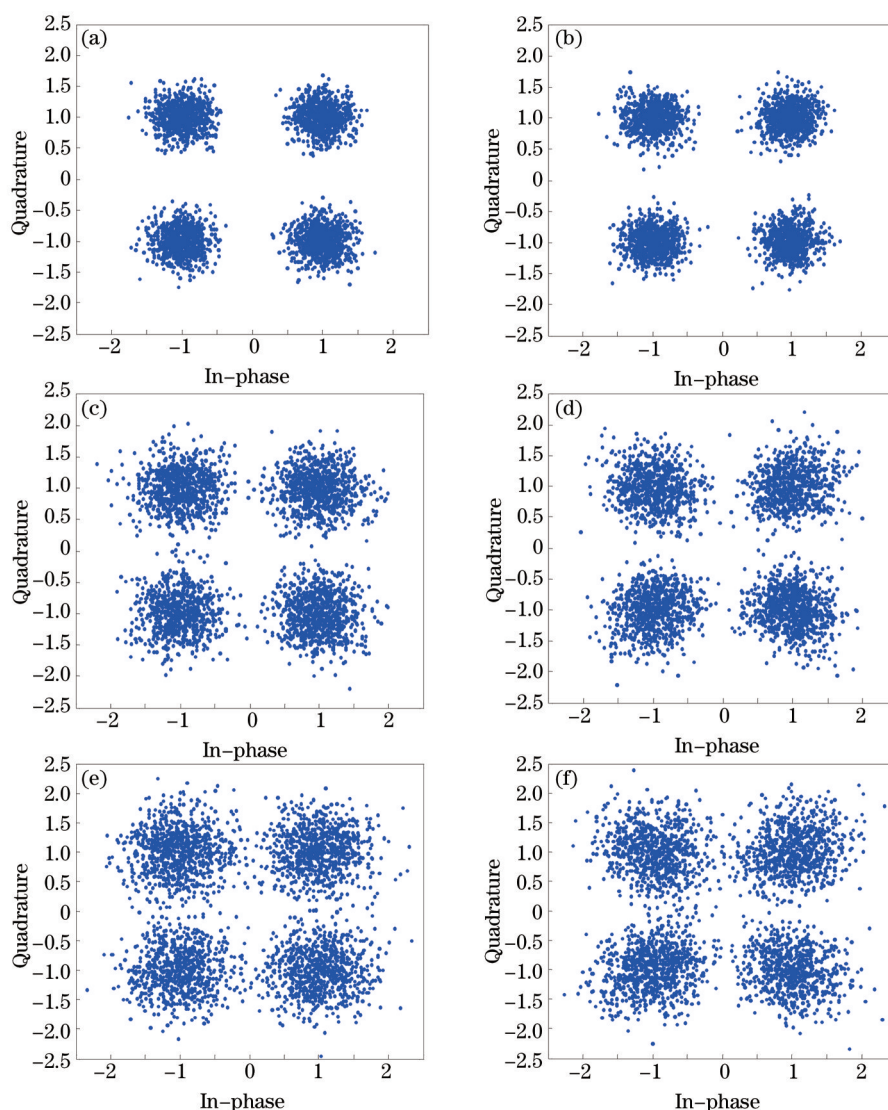


图 4 $R_{SN} = 0$ 时,不同湍流强度下 OFDM 和单载波 QPSK 解调信号的星座图

Fig.4 Constellation diagrams of OFDM signal and QPSK signal in case of different turbulence intensities when $R_{SN} = 0$

对比图 4(a)和图 4(b)中可以看出,弱湍流情况下,信噪比较小时,解调信号星座图更多表现为加性噪声和乘性噪声的共同影响。观察图 4,可以看出随着湍流强度的增大,单载波 QPSK 解调信号的星座图沿径向扩展越严重,即受乘性噪声的影响越来越明显。而任意湍流强度下,OFDM 解调信号的星座图较 QPSK 信号星座图的星座点相位更为清晰,收敛性明显改善,星座点分布服从高斯分布。

设定加性噪声信噪比 $R_{SN} = 10$,当 $\sigma_r = 0.2$ 时,OFDM 调制和单载波 QPSK 调制下接收端解调信号的星座图分别如图 5(a)、(b)所示;当 $\sigma_r = 1$ 时,OFDM 调制和单载波 QPSK 调制下接收端解调信号的星座图分别如图 5(c)、(d)所示;当 $\sigma_r = 2$ 时,OFDM 调制和单载波 QPSK 调制下接收端解调信号的星座图分别如图 5(e)、(f)所示。

从图 5(a)和图 5(b)中可以看出,弱湍流情况下,信噪比较大时,解调信号星座图更多地表现出乘性噪声影响。观察图 5,可以看出随着湍流强度的增大,单载波 QPSK 解调信号的星座图沿径向扩展越来越严重。然而,FSO-OFDM 系统解调信号星座图并没有表现出沿径向扩展,其收敛性良好,星座点分布服从高斯分布。

对比图 4 和图 5 所示的,不同湍流情况下的 FSO-OFDM 系统和 FSO-QPSK 系统解调信号星座图,可以发现当信号信噪比较小时,Gamma-Gamma 信道对 FSO-QPSK 系统的影响不是很明显;而当信号信噪比较大时,FSO-QPSK 系统更多地表现出 Gamma-Gamma 信道的影响。总体来说,FSO-OFDM 系统对 Gamma-Gamma 信道的大气湍流影响有抑制作用,星座图的分布呈二维高斯分布。

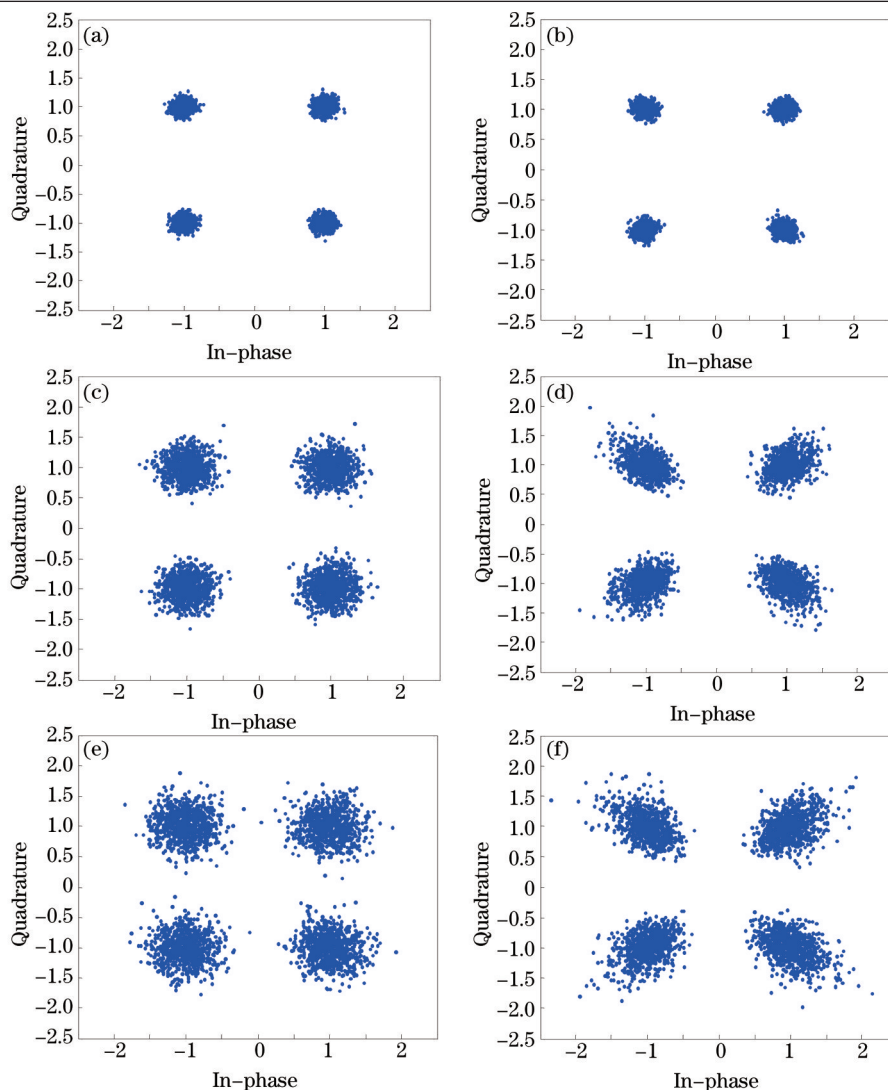


图 5 $R_{sn} = 10$ 时,不同湍流强度下 OFDM 和单载波 QPSK 解调信号的星座图

Fig.5 Constellation diagrams of OFDM signal and QPSK signal in case of different turbulence intensities when $R_{sn} = 10$

4 FSO-OFDM 实验研究

图 6 为 FSO-OFDM 实验测量原理图,图 7 为实验模块装置实物图。

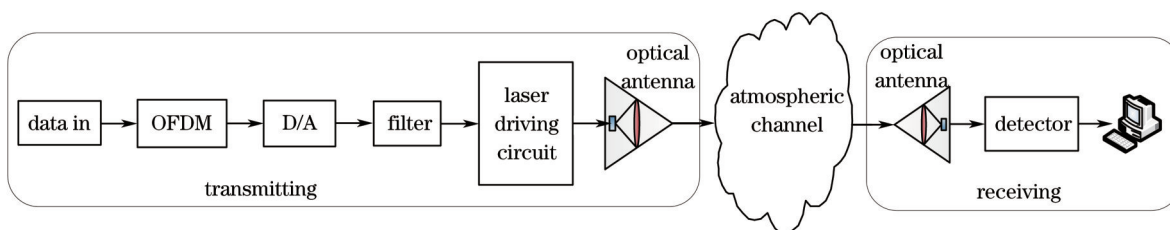


图 6 FSO-OFDM 实验测量原理图

Fig.6 FSO-OFDM experimental system

在实验中,OFDM 信源利用 Verilog 语言编程由现场可编程门阵列(FPGA)产生,OFDM 数据帧共有 32 个子载波,每个子载波采用 QPSK 调制。利用 OFDM 调制模块对数字信息进行码元变换、串并转换和星座映射等算法处理;通过 D/A 转换器对数字信号进行数模转换,调制系统采用高速数模转换电路板 AD9788 EVB 完成数模转换功能;再通过信号处理模块对 OFDM 信号进行电光转换,为其加适量直流偏置以适用于无线激光信道的传输;最后将调制好的 OFDM 信号加载到半导体激光器 LQA-850E 上(峰值功率为 60 mW,传输速

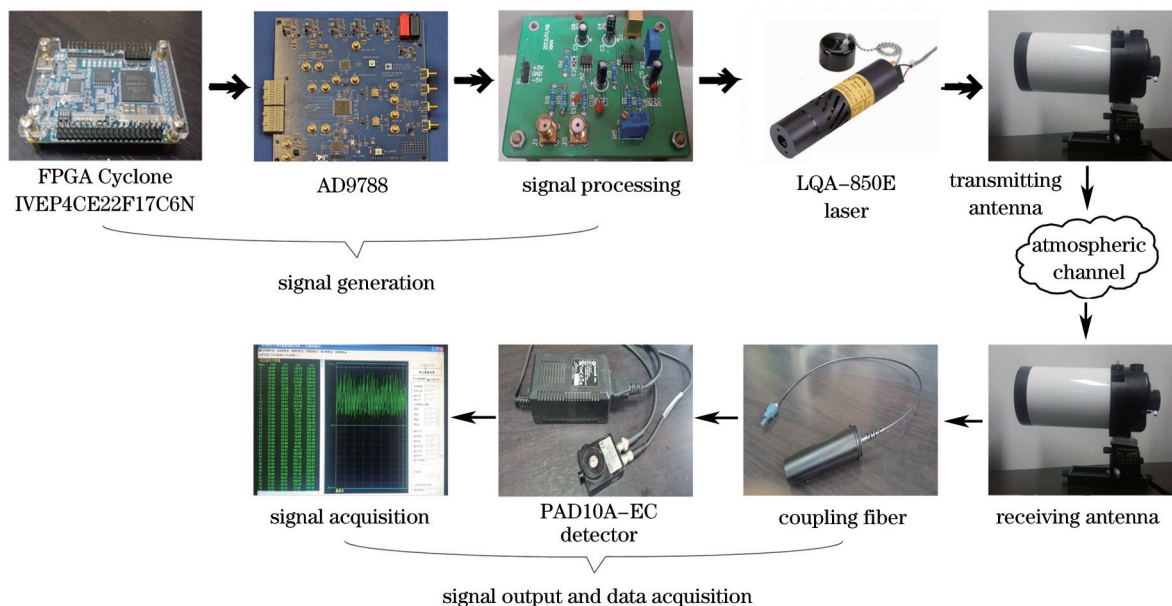


图7 实验装置模块实物图
Fig.7 Experimental device

率为 50 Mb/s), 经由 105 mm 卡塞格伦光学天线发射。信号经大气信道(距离 1.3 km)到接收端, 接收端通过 105 mm 卡塞格伦光学天线将 850 nm 光信号耦合进单模光纤内, 然后使用光电探测器 PAD10A-EC 把光信号转化为电信号, 利用阿尔泰 PCI8002 采集卡对接收信号进行采集。最后利用 Matlab 程序对数据进行解调分析。FSO-QPSK 实验系统与之类似, 不同的是生成的 QPSK 信号是加载在激光器上后发射到接收系统。

图 8(a) 为实验所得 32 子带 FSO-OFDM 调制(其中每个子带都是 QPSK 调制)系统解调信号星座图; 图 8(b) 为单载波 FSO-QPSK 系统解调信号星座图。从图 8(a) 中可以看出, 星座点无混叠, 且分布较为集中清晰; 从图 8(b) 中可以看出, 其星座点分布比图 8(a) 星座点分布弥散严重。

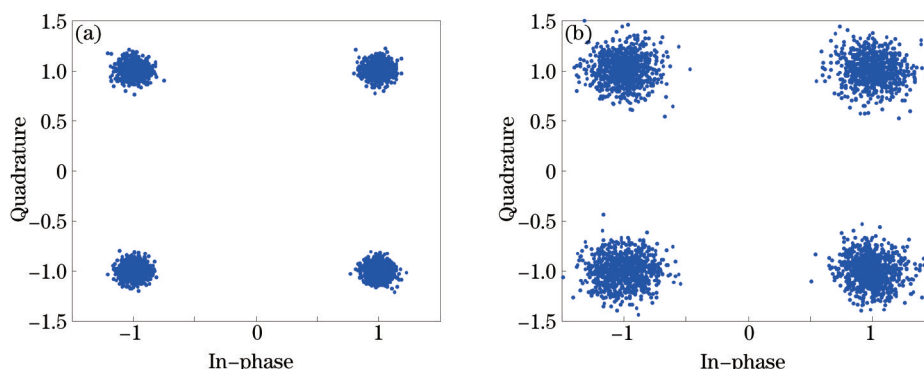


图8 实验所得 FSO-OFDM 和单载波 FSO-QPSK 解调信号的星座图
Fig.8 Constellation diagrams of OFDM signal and QPSK signal in experiment

对 FSO-OFDM 和 FSO-QPSK 系统解调信号的星座点做概率密度统计分析, 可以得出如图 9 所示的概率密度曲线。从图 9 可以明显看出, FSO-OFDM 信号的星座点的概率密度分布的方差较小, 会更好地收敛在理想的解调中心位置, 故 FSO-OFDM 系统信噪比大, 误码率低。据此可以得出结论: FSO-OFDM 系统性能优于 FSO-QPSK 系统性能。这是由于 OFDM 具有频谱效率高和抗码间干扰好的优势。

5 结 论

基于 FSO-OFDM 的系统原理, 搭建了系统模型。通过仿真分析了信道噪声对 FSO-OFDM 系统性能的影响; 通过 FPGA 设计实现了一个初步的 FSO-OFDM 通信系统。其中包括信道编码、交织、星座映射、IFFT 和插入循环前缀、数模转换、电光转换等部分。实验表明 FSO-OFDM 系统具有较好的抗码间串扰的性能, 其误

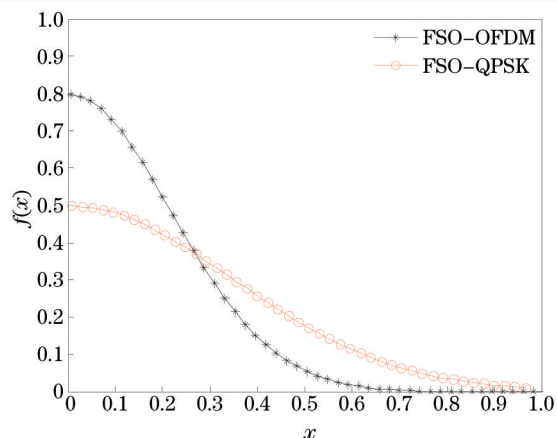


图9 FSO-OFDM与FSO-QPSK解调信号星座图星座点分布对比

Fig.9 Comparison for constellation of FSO-OFDM signal and FSO-QPSK signal

码率低于单载波调制系统,更适合在大气湍流中应用。

参考文献

- 1 Zhao Li, Ke Xizheng. A free space optical communication-orthogonal frequency division multiplexing model based on time frequency code[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(10): 2757-2762.
赵黎,柯熙政.基于时频编码的自由空间光通信-正交频分复用系统模型[J].中国激光,2009,36(10):2757-2762.
- 2 Liu Xuejun, Qiao Huijun. Electronic compensator for 100-Gb/s PDM-CO-OFDM long-haul transmission systems[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(3): 030602.
- 3 Liu Binhui, Chen Lin. Least mean square adaptive algorithm for direct-detection optical orthogonal frequency division multiplexing transmission system[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0905005.
刘彬晖,陈林.直接检测的光正交频分复用传输系统最小均方自适应算法[J].中国激光,2012,39(9):0905005.
- 4 William Shieh, Ivan Djordjevic. OFDM for Optical Communications[M]. Beijing: Publish House of Electronics Industry, 2001: 21-22.
- 5 Lu Zhenlong, Wang Junhua, Sun Yanzan, *et al.*. Inter-carrier interference suppression algorithm for OFDE-PON system based on pseudo-symmetrical training sequences[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1006002.
路振龙,王军华,孙彦赞,等.基于伪对称序列的OFDM-PON系统载波间干扰抑制算法[J].光学学报,2013,33(10):1006002.
- 6 Lu Jia, Hu Yuanyuan, Liu Jianfei, *et al.*. All-optical wavelength conversion based on parallel dual-pump for polarization multiplexing OFDM signal in SOA[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0205005.
卢嘉,胡园园,刘剑飞,等.基于SOA的平行双抽运结构偏振复用OFDM信号的全光波长变换[J].中国激光,2015,42(2):0205005.
- 7 Wang Lingzi, Tang Xianfeng, Zhang Xiaoguang, *et al.*. Blind phase estimation algorithms based on decision-directed and decision-feedback in PDM-CO-OFDM system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305001.
王凌子,唐先锋,张晓光,等.PDM-CO-OFDM系统中基于判决引导与判决反馈的盲相位估计算法[J].中国激光,2014,41(3):0305001.
- 8 R Prasad. OFDM for wireless communications systems[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(8): 709-711.
- 9 Yi Sun. Bandwidth-efficient wireless OFDM[J]. IEEE J Sel Commun, 2001, 19(11): 2267-2278.
- 10 Roy You, Joseph M Kahn. Average power reduction techniques for multiple-subcarrier intensity-modulated optical signals[J]. IEEE Transactions on Communication, 2001, 49(12): 2164-2171.
- 11 Tomoaki Ohtsuki. Multiple-subcarrier modulation in optical wireless communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(3): 74-79.
- 12 O González, R Pérez-Jiménez, S Rodríguez, *et al.*. Adaptive OFDM system for communications over the indoor wireless optical channel [J]. IEEE Proc Optoelectron, 2006, 153(4): 139-144.
- 13 W Shieh, C Athaudage. Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing[J]. Electron Lett, 2006, 42(10): 587-589.
- 14 Ivan B Djordjevic, Bane Vasic, M Neifeld. LDPC-coded OFDM for optical communication system with direct detection[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2007, 13(5): 1446-1454.
- 15 Neda Cvijetic, Dayou Qian, Ting Wang. 10 Gb/s free-space optical transmission using OFDM[C]. Conference on Optical Fiber

- Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, San Diego, 2008: 1432-1436.
- 16 Yuan Rong. Overview of OFDM for optical communication systems[J]. Optical Communication Technology, 2011, 35(8): 352-359.
原 荣. 光正交频分复用(OFDM)光纤通信系统综述[J]. 光通信技术, 2011, 35(8): 352-359.
- 17 Lie-Liang Yang. Multicarrier Communications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 74-77.
- 18 S B Weinstein, P M Ebert. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Communication Technology, 1971, 19(5): 628-34.
- 19 Xie Mengqi. Research on FSO-OFDM System Affected by Atmospheric Dispersion[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012: 35-36.
解孟其. 大气色散对 FSO-OFDM 系统的影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2012: 35-36.

栏目编辑: 王晓琰