

FSO-OFDM 系统中峰均比控制方法的实验研究

柯熙政, 亢 焯, 刘 娟

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘 要: 自由空间光通信正交频分复用 (Free Space Optical-Orthogonal Frequency Division Multiplexing, FSO-OFDM) 系统面对的主要问题是峰均比 (PAPR) 高而导致的信号失真。而选择性映射 (Selected Mapping, SLM) 算法可以有效解决 FSO-OFDM 系统中的峰均比问题。目前, 对峰均比抑制算法的研究还主要集中在理论方面, 而且主要在发端研究降低峰均比的方法, 而很少有文献将其应用于实际的信道传输。所以对 FSO-OFDM 系统中峰均比抑制算法的具体实现, 尤其是在接收端进行实际验证的方法就显得意义重大。文中通过仿真信道传输和硬件实验都验证了采用 SLM 算法后 FSO-OFDM 系统的抗噪声干扰性能增加, 并验证了 SLM 算法应用于实际的有效性, 且该实验结果也为降低 PAPR 的后续研究奠定了实验基础。

关键词: 正交频分复用; 峰均比; 选择性映射; 自由空间光通信

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0622001

Experimental research on PAPR reduction algorithms in FSO-OFDM system

Ke Xizheng, Kang Ye, Liu Juan

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

Abstract: Signal distortion caused by High Peak to Average Power Ratio (PAPR) is the major disadvantages that the Free Space Optical (FSO) Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) system has to deal with, while Selected Mapping algorithm (SLM) can effectively solve this problem. The research on PAPR, however, is mainly focused on theory simulation, and especially on the reduction of PAPR at the transmitter. Therefore, works on the implementation of the algorithm on PAPR reduction in FSO-OFDM system, especially the verified way of reducing PAPR at the receiver, are of significance in literature and practice. It was verified that the performance of FSO-OFDM system on noise immunity can be increased after using the SLM algorithm through simulation, and effective when applied to the channel transmission in hardware experiments. And this experimental results lay the foundation for follow-up studies on the reduction of the PAPR.

Key words: OFDM; PAPR; SLM; FSO

收稿日期: 2016-10-05; 修订日期: 2016-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(61377080, 60977054)

作者简介: 柯熙政(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事无线光通信方面的研究。Email: xzke@263.com

0 引言

将正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)^[1] 技术应用于无线激光通信中组成 FSO-OFDM 系统, 可以充分发挥其频谱效率高, 支持高速数据传输, 抗多径干扰 (Inter Symbol Interference, ISI) 以及频率选择性衰落能力强等优势。对于 N 个子载波叠加而成的 OFDM 信号, 若这 N 个子载波都以相同相位求和时, 峰值功率将变成平均功率的 N 倍, 峰均比值会随着子载波数目 N 的增大而增大, 而经过快速离散傅里叶逆变换 (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) 输出的 OFDM 信号幅值变化范围相当大, 导致后端只能通过功放限幅处理才能使用, 可如若限幅又势必引入非线性失真, 因而采用技术手段抑制 FSO-OFDM 系统中的峰均比尤为关键。

当前研究降低 OFDM 信号峰均比值^[2-5]的方法主要包括限幅、编码和加扰等。限幅技术, 实现简单, 但可能会引起带内和带外干扰, 同时会破坏子载波之间的正交性^[6]。编码技术, 不会引起失真, 也不会产生带外辐射, 但编码速率下降时, 存在带宽利用率和复杂度高等问题^[7]。加扰技术, 包括选择性映射 (Selected Mapping, SLM) 和部分传输序列 (Partial Transmit Sequences, PTS) 等技术, 加扰技术对输入的 OFDM 数据使用算法增加扰码^[8], 使之生成具有最小 PAPR 的数据块, 从而降低整个 OFDM 系统高 PAPR 的概率^[9]。

文中采用选择映射 (SLM) 算法对 FSO-OFDM 系统的数据进行加扰处理, 通过仿真和实验验证了 SLM 方法对于降低 FSO-OFDM 系统 PAPR 的有效性, 同时也分析了 SLM-OFDM 系统和 OFDM 系统误码率性能。

1 FSO-OFDM 系统的 PAPR 概率分布

1.1 FSO-OFDM 系统介绍

在 FSO 系统中, 一般是采用副载波强度调制/直接检测 (Intensity Modulation and Direct Detection, IM/DD) 的方式, OFDM 基带信号用调制光的强度来表征。因此, OFDM 基带信号必须是实信号。而且, 它是利用 OFDM 信号的包络变化来调制光强度, 激光

的瞬时发射光功率不可能为负值, 故输出信号是非负的。所以, 在射频通信中的双极性 OFDM 复信号必须通过 IQ 调制及加上直流偏置转换为单极性的实信号, 才能适合在 FSO 系统中传输。

如图 1 为 FSO-OFDM 系统收发机框图。

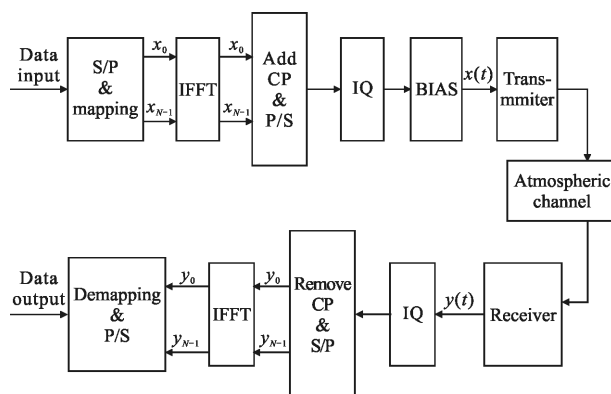


图 1 FSO-OFDM 系统框图

Fig.1 Diagram of FSO-OFDM system

1.2 PAPR 的概率分布

考虑不进行插入导频和信道编码等操作的理想情况下, 输入的数据首先进行串并转换, 然后再通过 4-QAM 映射为频域符号。频域信号表示为:

$$X=[X_0, X_1, \dots, X_K, \dots, X_N] \quad (1)$$

式中: N 为子载波个数, 设第 K 个子载波频域信息为 $X_K=a_K+jb_K$, 则经过离散傅里叶逆变换 (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) 后, 输出的 OFDM 时域信号表示为:

$$x(n)=\sum_{k=0}^{N/2-1} 2\left(a_k \cos \frac{2\pi kn}{N}-b_k \sin \frac{2\pi kn}{N}\right), n=0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

由于 FSO 系统中的 OFDM 信号是正的实信号, 故其峰均比可以定义^[10]为:

$$PAPR=10\lg \frac{\max [x(n)^2]}{E[x(n)^2]} \quad (3)$$

式中: $E[\cdot]$ 表示求数学期望。

据知, FSO-OFDM 系统的峰值大于某一门限值 z 的概率分布为^[11]:

$$P(\text{power}>z)=1-P(\text{power}\leq z) \quad (4)$$

对于一个包含 N 个子载波的 OFDM 系统, 由中心极限定理可知, 对于较大的子载波数 N , $x(n)$ 的实部和虚部样点服从均值为 0、方差为 0.5 的高斯分布, 因此, OFDM 符号的幅度服从瑞利分布, 功率服

从有中心的、具有 2 个自由度的 χ^2 分布(均值为 0, 方差为 1), 所以, 可以得到其累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)^[12]为:

$$P(\text{power} \leq z) = F_{\text{power}}(z) = \int_0^z \exp(-y) dy = 1 - \exp(-z) \quad (5)$$

对于奈奎斯特采样下的 OFDM 信号, 各样点之间是不相关的, 则 OFDM 信号的峰均比值超过门限值 z 的概率分布, 即互补累积分布函数(Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF)为:

$$\text{CCDF}(\text{PAPR}) = P(\text{PAPR} > \text{PAPR}_0) = 1 - (1 - e^{-\text{PAPR}_0})^M \quad (6)$$

根据公式(6)可知, 随着子载波数目 N 的增加, 出现高于门限值 z 的概率会增大, 即出现高 PAPR 的概率也会增大。

文中采用 CCDF 能直观地反映 FSO-OFDM 系统中 PPAR 的抑制性能, 并且在发射端通过 MATLAB 软件仿真得到 CCDF 曲线图, 通过分析 CCDF 曲线图来评价峰均比抑制性能的好坏。

2 选择性映射算法降低 PAPR

选择性映射方法的基本思想^[3]是利用 M 个统计独立的向量 $X^{(k)} (k=1, 2, \dots, M)$ 表示相同信息, 选择其对应的 OFDM 时域序列 x_k 中具有最小峰均比值的一路序列进行传输, 其原理图如图 2 所示。

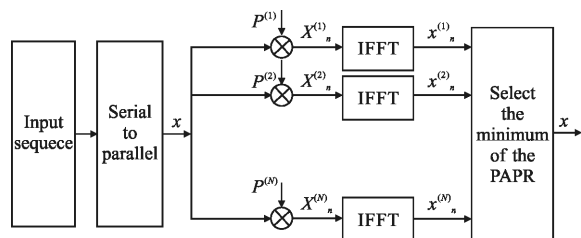


图 2 选择性映射方法的原理框图

Fig.2 Principle framework of SLM

FSO-OFDM 系统发射机内信号可以表示为:

$$x_k = \text{IFFT}[x_n](n, k=0, \dots, N-1) \quad (7)$$

假设存在 M 个长度为 N 的不同随机相位序列矢量, 如公式(8)所示:

$$P^{(\mu)} = (p_0^{(\mu)}, p_1^{(\mu)}, \dots, p_{N-1}^{(\mu)}) (\mu=1, 2, \dots, M) \quad (8)$$

式中: $p_i^{(\mu)} = \exp(j\varphi_i^{(\mu)})$, $\varphi_i^{(\mu)}$ 在 $[0, 2\pi]$ 内是均匀分布。将这 M 个相位矢量分别和 IFFT 的输入序列 X 进行对应的点乘, 则会得到 M 个不一样的输出序列 $X^{(\mu)}$, 即

$$X^{(\mu)} = (X_0^{(\mu)}, X_1^{(\mu)}, \dots, X_{N-1}^{(\mu)}) = \langle X \cdot P^{(\mu)} \rangle = (X_0 P_0^{(\mu)}, X_1 P_1^{(\mu)}, \dots, X_{N-1} P_{N-1}^{(\mu)}) \quad (9)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 这个符号表示的是信号间的点乘。然后对得到的 M 个不同的序列 $X^{(\mu)}$ 分别进行 IFFT 计算, 随之得到 M 个不同的输出序列 $(x_0^{(\mu)}, x_1^{(\mu)}, \dots, x_{N-1}^{(\mu)})$ 。

最后, 在给定 PAPR 门限值的条件下, 从这 M 个时域信号序列内选择 PAPR 有最小峰均比值的一路进行传送。在接收端, 首先将接收到的信号进行快速傅里叶变换, 接着根据接收到的边带信息进行与发送端反相操作恢复原始信号。SLM 方法的抑制 PAPR 的性能只取决于相位因子的设计, 对各种调制方法都适用, 且对系统中的子载波数目也没有苛刻要求。

如果 PAPR 的门限大于 PAPR_0 , 则原始 OFDM 序列的 PAPR 超过门限值的概率定义为 $P(\text{PAPR} > \text{PAPR}_0)$, 因此, 这 M 个序列 $X^{(\mu)} (\mu=0, 1, \dots, M-1)$ 的 PAPR 都超过门限值的概率就会变为 $[P(\text{PAPR} > \text{PAPR}_0)]^M$, 根据 OFDM 系统内的 PAPR 分布的 CCDF 可表示为:

$$[P(\text{PAPR} > \text{PAPR}_0)] = 1 - (1 - e^{-\text{PAPR}_0})^K \quad (10)$$

则采用 SLM 算法后, OFDM 系统 PAPR 分布的 CCDF 为:

$$[P(\text{PAPR} > \text{PAPR}_0)]^M = (1 - (1 - e^{-\text{PAPR}_0})^K)^M \quad (11)$$

其中, $M=1$ 时为原始 OFDM 系统 PAPR 分布的 CCDF。SLM 算法对 OFDM 信号的 PAPR 具有明显的抑制。

理论上选择性映射方法可以大大降低系统的峰均比值, 但却是以增加系统复杂度为代价的。其一, 需要额外的计算 $M-1$ 次 N 点傅里叶逆变换, 增加了计算的复杂度; 其二, 还需要额外传送边带信息来确保系统接收端完整地恢复出发送的信号, 因此降低了系统的数据传输速率。总的来说, 选择映射方法是通过引入边带信息来减少 OFDM 系统中峰值出现的概率, 并不是直接将峰值信号削减掉, 从而降低了系统的误码率, 并且也不存在带内、带外噪声。

3 性能仿真

3.1 发射端 SLM 算法仿真分析

仿真时在发端采用选择性映射算法来降低

FSO-OFDM 系统中的 PAPR, 其基本思想是将多个不同的相位因子加到原信号上构成多个统计独立的向量, 选择对应的 OFDM 时域序列中具有最小峰均比值的各路序列进行传输。

图 3 描述的是相位序列 M 取不同值时的峰均比值情况, 这里用 CCDF 性能曲线来描述峰均比抑制情况。仿真参数: 10 000 个随机独立的 OFDM 信号, 4-QAM 调制方式, 载波数为 128, 过采样率为 4。

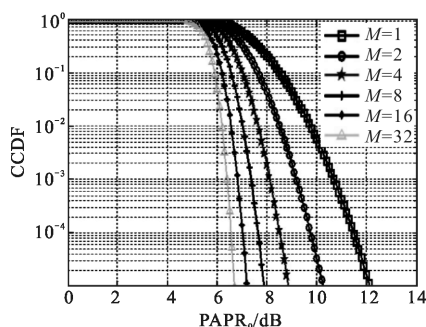


图 3 SLM 系统中相位矢量 M 不同的条件下 PAPR 的 CCDF 仿真曲线

Fig.3 Emulational curve of the PAPR of different phase vector M in SLM system

从图 3 可以看出, 当 $M=32$, 在 $CCDF=10^{-4}$ 时, 经过 SLM 算法后系统的峰均比性能比原始信号降低了大约 4 dB。随着随机相位数的增加, 在 M 取值为 2、4、8、16、32 时峰均比值是逐渐降低的, 可以看出随着 M 值的增多, 峰均比抑制性能越来越好, 但是当 M 值增加到一定的程度后, 抑制峰均比的效果在逐渐减弱。

图 4 讨论的采用 SLM 算法后的系统与原始 OFDM 系统中 PAPR 对比 CCDF 曲线图。其中, 相位序列 $M=1$ 时为原始 OFDM 系统 PAPR 分布的 CCDF。 $M=32$ 时为加了 SLM 算法同时相位序列值为 32 的 SLM-OFDM 系统 PAPR 分布的 CCDF。这里用 CCDF 性能曲线来描述峰均比抑制情况。仿真参数: 10 000 个随机独立的 OFDM 信号, 4-QAM 调制方式, $N=128$, 随机序列的取值为 $\{\pm 1, \pm j\}$, 过采样率为 4。

如图 4 所示, 分别为原始 OFDM 系统和 SLM-OFDM 系统峰均比的 CCDF 曲线对比图。纵坐标 CCDF 是指系统中 PAPR 值超过某一门限值的概率, 横坐标表示的是门限值 $PAPR_0$ 。在 $CCDF=10^{-4}$ 概率处, 经过 $M=32$ 的 SLM 算法后系统的峰均比性能比

原始信号降低了大约 5 dB 左右。结果表明 SLM 方法能够有效降低 FSO-OFDM 系统的峰均比, 代价是增加了系统的复杂度。

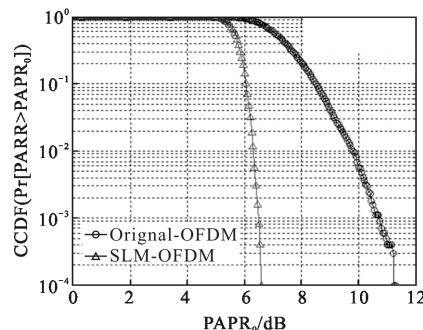


图 4 OFDM 和 SLM-OFDM 降低 PAPR 的 CCDF 曲线对比
Fig.4 CCDF curves of OFDM and SLM-OFDM in reducing system PAPR

3.2 信道仿真分析

根据 FSO-OFDM 系统原理建立仿真信道传输模型, 对比分析 Gamma-Gamma 信道中乘性噪声与加性高斯白噪声共同作用的混合噪声情形下的 FSO-OFDM 系统与 SLM-OFDM 系统的星座图。

3.2.1 信道模型

为了研究 FSO-OFDM 系统的性能, 首先讨论信道中的噪声影响。

噪声模型如图 5 所示, 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 $s(t)k(t)+n(t)$ 形式, 其中 $k(t)$ 为乘性噪声, 信号上同时叠加 $n(t)$ 和 $k(t)$ 时, 则表示混合噪声作用于系统。

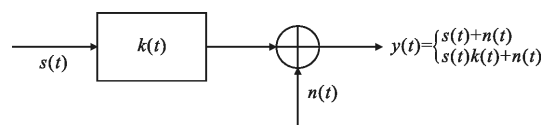


图 5 噪声模型

Fig.5 Noise model

为了表示大气湍流的强度, 引入无量纲的 Rytov 方差概念, 表示为:

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (12)$$

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

将 Gamma-Gamma 分布的信道模型的光强因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 分布的信道模型的表达式如下^[14]:

$$f_i(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \cdot I^{\alpha+\beta/2-1} \cdot K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}), I > 0 \quad (13)$$

式中: I 为光信号强度; α 和 β 为概率密度函数参数; $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数; $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 为 $\alpha-\beta$ 阶的第二类修正 Bessel 函数。

3.2.2 星座图分析

图 6、7 为在 CCDF=10⁻⁴ 概率处, 原始 OFDM 系统的峰均比为 11.5 dB, SLM-OFDM 系统的峰均比降到 6.5 dB 的条件下, 不同的 SNR 和光强起伏方差作用于 OFDM 系统和 SLM-OFDM 系统的解调端星座图。

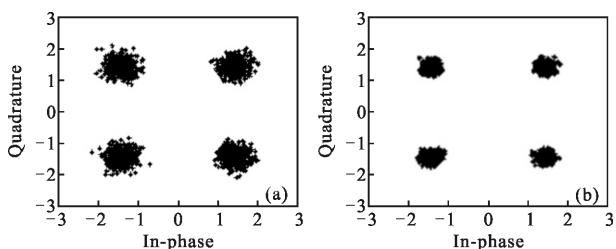


图 6 SNR=20, $\sigma_R^2=0.1$ 情况下 OFDM(a)和 SLM-OFDM(b) 解调信号的星座图

Fig.6 SNR=20, $\sigma_R^2=0.1$, constellation diagram of OFDM signal (a) and SLM-OFDM signal (b)

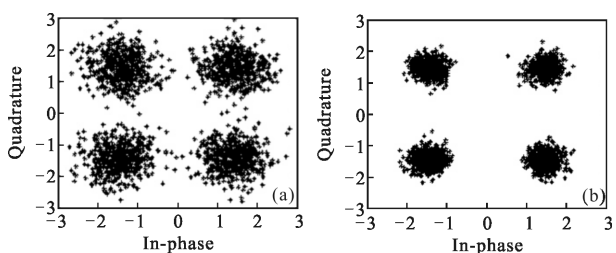


图 7 SNR=20, $\sigma_R^2=0.3$ 情况 OFDM (a)和 SLM-OFDM (b) 解调信号星座图

Fig.7 SNR=20, $\sigma_R^2=0.3$, constellation diagram of OFDM signal (a) and SLM-OFDM signal (b)

图 6 显示的是在 AWGN 信道下加性噪声的 SNR 值取 20, 同时 Gamma-Gamma 信道下乘性噪声的光强起伏方差 $\sigma_R^2=0.1$ 的情况下, OFDM 调制和 SLM-OFDM 调制下接收端解调信号的星座图。

图 7 显示的是在 AWGN 信道下加性噪声的 SNR 值取 20, 同时 Gamma-Gamma 信道下乘性噪声

的光强起伏方差 $\sigma_R^2=0.3$ 的情况下, OFDM 调制和 SLM-OFDM 调制下接收端解调信号的星座图。

图 6、7 给出了信道的光强起伏方差 $\sigma_R^2=0.1$ 和 $\sigma_R^2=0.3$ 的情况下, SNR 取 20 时的混合噪声对解调端星座图的影响情况。对比可知, 将光强起伏方差 σ_R 值由 0.1 增大到 0.3 时, 图 6(a)的星座点比图 7(a)聚合度高很多, 同时图 6(b)的星座点比图 7(b)聚合度也高很多, 可以看出随着光强起伏方差的增大, 星座点的聚合度越来越低, 系统性能也越来越差。同时在弱湍流和中湍流条件下, 对比分析发现, 在相同 SNR 值和光强起伏方差共同作用于系统的条件下, 图(b)的星座点聚合度较图(a)的高。说明加上 SLM 算法后的系统, 抗混合噪声干扰的性能也增加, 系统的误码率减小。

3.2.3 误码率分析

图 8 为在 CCDF=10⁻⁴ 概率处, 原始 OFDM 系统的峰均比为 11.5 dB, SLM-OFDM 系统的峰均比降到 6.5 dB 的条件下, 不同的 SNR 和光强起伏方差 σ_R^2 值等于 0.5 时作用于 OFDM 系统和 SLM-OFDM 系统的误码率对比曲线图。

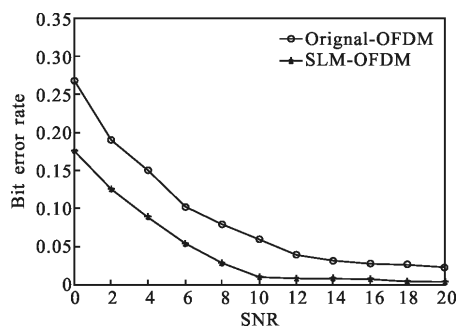


图 8 混合噪声情况下误码率曲线图

Fig.8 Bit error rate curve in mixture noise

由图 8 可以看出, 当信噪比较高时, 由于受大气湍流的影响, 原始 OFDM 系统和 SLM-OFDM 系统的误码率不会随着信噪比的增大而进一步减小, 而是分别收敛于一个值附近。例如, 当 $\sigma_R^2=0.5$, 信噪比高于 15 dB 时, 原始 OFDM 系统的误码率达到 0.02, SLM-OFDM 系统的误码率达到 0.003。当信噪比低于 10 dB 时, 两种系统受加性噪声的影响都大。同时也可以明显看出, 整体 SLM-OFDM 系统误码率曲

线图一直在 OFDM 系统误码率曲线图的下方,所以,经过 SLM 算法后的 OFDM 系统的误码率较原始的 OFDM 系统有明显的降低。

4 实验

4.1 实验系统组成

如图 9 为笔者等搭建的 FSO-OFDM 实验测量原理图,图 10 为实验模块装置实物图。

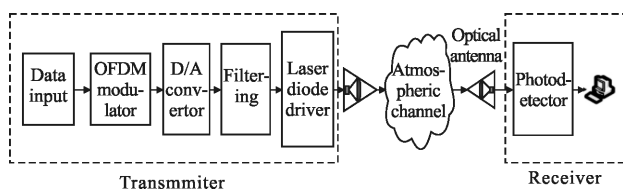


图 9 FSO-OFDM 实验测量原理图

Fig.9 Measurement of FSO-OFDM system schematic diagram

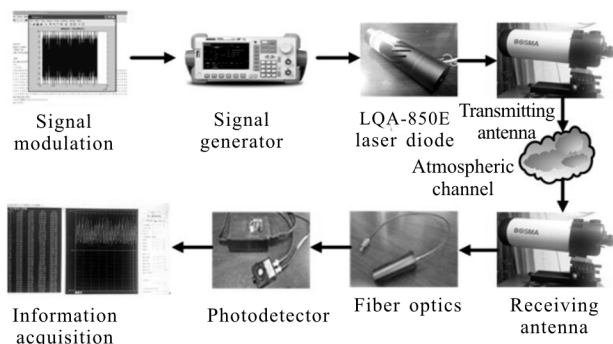


图 10 实验装置各模块实物图

Fig.10 Modules of experimental device

其中,发射端设备主要包括:DG5000 系列函数/任意波形发生器、LQA850 模拟激光器、信标激光器及发射望远镜。接收端设备主要包括:耦合光纤、光电探测器(PDA10A-EC)、接收望远镜及 PC 机(信息采集)。

整个实验过程为,从信号发生器输出的 OFDM 信号驱动激光器,使信号加载到激光上,使激光器输出光波,通过发射天线将光信号发射出去。在接收端,通过接收望远镜将光耦合到光纤中,再通过光电探测器转化为电信号,然后将电信号传输到 PC 机上,对其进行进一步的信号采集处理。在 MATLAB 上选取采集卡采集到的数帧完整的数据,然后观察对比原始 OFDM 信号和 SLM-OFDM 信号的星座图。

4.2 实验结果分析

笔者等在西安理工大学教学 5 楼走廊进行实

验,传输距离 50 m,测试信号长度取 10 000 个点。利用 Matlab 对在接收端采集到的数据进行解调,然后通过星座图对 FSO-OFDM 及 SLM-OFDM 系统进行性能对比分析。

通过观察 OFDM 系统和 SLM-OFDM 系统的星座图,可以研究分析出加了 SLM 算法后对 OFDM 系统性能的影响。图 11 为在 CCDF=10⁻⁴ 概率处,原始 OFDM 系统的峰均比为 11.5 dB,SLM-OFDM 系统的峰均比降到 6.5 dB 的条件下,进行短距离实验的 OFDM 系统的解调端星座图和 SLM-OFDM 系统解调端星座图。

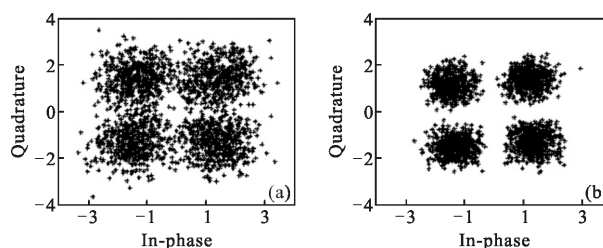


图 11 OFDM(a)和 SLM-OFDM(b)解调信号的星座图

Fig.11 Constellation diagram of experiment of OFDM signal (a) and SLM-OFDM signal (b)

图 11 中(a)和(b)分别是实验后的 OFDM 信号和 SLM-OFDM 信号的解调星座图,通过星座图的聚合程度可以看出,实验测得的 SLM-OFDM 信号星座图较 FSO-OFDM 信号星座图要聚合,所以在经过 SLM 算法后,降低了系统的峰均比,同时又在同等噪声的条件下,将信号的幅值都归一化到同一区间内,使得 SLM-OFDM 信号的平均功率大于 OFDM 信号的平均功率,进而提高了信噪比,误码率经测算由 OFDM 系统的 0.025 8 降低到 SLM-OFDM 系统的 0.007 3。实验结果也验证了在进行信道传输时,经过 SLM 算法后的 OFDM 信号较原始的 OFDM 信号质量有所改善。

5 结论

OFDM 作为一种高速的数据传输技术,由于其固有的多载波系统高峰比的缺点,在一定程度上限制了它的实用化^[8]。选择性映射技术能够有效地降低 OFDM 信号峰均比的概率。通过仿真验证了 SLM 算法,能够使系统的峰均比较原始的 OFDM 系统有一定程度的降低。当在 CCDF=10⁻⁴ 概率处时,采用

SLM 算法后系统的峰均比原始 OFDM 系统降低了约 5 dB,结果表明采用 SLM 算法能够有效降低 FSO-OFDM 系统的峰均比,代价是增加了系统的复杂度。实验基于 FSO 系统,采用激光光源,强度调制,使用光电探测器(PDA10A-EC)来接收信号,实测采用 SLM 算法的 FSO-OFDM 信号星座图与原始 OFDM 信号星座图相比,聚合度明显要高,说明在进行信道传输时,经过 SLM 算法后的 OFDM 信号较原始的 OFDM 信号质量有所改善。该实验结果也为进一步降低系统的 PAPR 奠定了研究基础。

参考文献:

[1] Yi Sun. Bandwidth-efficient wireless OFDM [J]. *IEEE Journal on Selected in Communications*, 2001, 19 (11): 2267-2278.

[2] Zhao Li, Ke Xizheng, Sun Linli. Research on reducing the PAPR for FSO -OFDM system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1749-1753. (in Chinese)
赵黎, 柯熙政, 孙林丽. 降低 FSO-OFDM 系统峰值平均功率比研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1749-1753.

[3] Tomoaki Ohtsuki. Multiple-subcarrier modulation in optical wireless communication [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(3): 74-79.

[4] Wang Yi, Yang Shuai, Ma Jing, et al. Performance analysis of coherent OFDM system in free space optical communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 200-204. (in Chinese)
王怡, 杨帅, 马晶, 等. 自由空间光通信中相干 OFDM 系统性能分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 200-204.

[5] Liang Youcheng, Chen Haitao, Zhang Haojie. Analyzing of WDM optical transmission systems based on interleaved OFDM technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 721-724. (in Chinese)
梁有程, 陈海涛, 张豪杰. 基于交叉复用技术的 OFDM-WDM 光传输系统的性能分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 721-724.

[6] Lin Chen, Yong Fang. PAPR reduction in optical OFDM systems using asymmetrically clipping and filtering technique [J]. *Computational Information System*, 2012, 8 (7): 2733-2740.

[7] Tao J, Zhu G X. Complement block coding for reduction in peak to average power ratio of OFDM signals [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2005, 43(9): 17-22.

[8] Shao Yufeng, Chen Nan, Fan Jingyuan, et al. Generation of 16-QAM-OFDM signals using selected mapping method and its application in optical millimeter-wave Access system [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(5): 356-359.

[9] Popoola W O, Ghassemlooy Z, Stewart B G. Pilot-assisted PAPR reduction technique for optical OFDM communication systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(7): 1374-1382.

[10] Song Tiecheng, You Xiaohu, Shen Lianfeng. Approach based BPM is to reduce PAPR of OFDM system [J]. *Journal of Applied Science*, 2002, 20(4): 399-403. (in Chinese)
宋铁成, 尤肖虎, 沈连丰. 基于 BCM 降低 OFDM 系统 PAPR 的方法 [J]. 应用科学学报, 2002, 20(4): 399-403.

[11] Kaiho H, Hattori T. Reduced complexity of spread spectrum OFDM for PAPR reduction and its basic performance [C]// TENCON 2009-2009 IEEE Region 10 Conference, 2009: 1-5.

[12] Chen H, Haimovish M. Iterative estimation and cancellation of clipping noise for OFDM signals [J]. *IEEE Communications Letters*, 2003, 7(7): 305-307.

[13] Bauml R W, Fischer R F H, Huber J B. Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selected mapping [J]. *Electronics Letters*, 1996, 32(22): 2056-2057.

[14] Xie Mengqi. Study on the effect of atmospheric dispersion on FSO -OFDM system [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012: 35-36. (in Chinese)
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.