

基于 SLM-SCMA 技术的 ACO-OFDM 系统性能分析

宋秋艳¹, 陈根祥², 冯素娟¹

(1. 曲阜师范大学 物理工程学院, 山东 曲阜 273165; 2. 中央民族大学理学院, 北京 100081)

摘要:针对非对称限幅光正交频分复用(ACO-OFDM)系统高峰值平均功率比(PAPR)的问题,提出了一种降低 PAPR 的上行多址方案,采用选择性映射-稀疏码分多址(SLM-SCMA)技术抑制 ACO-OFDM 系统的 PAPR,并通过 Matlab 软件对 ACO-OFDM 系统性能进行了仿真。仿真结果表明:当子载波数 $N=512$ 、CCDF 值为 10^{-4} 时,不采用和采用 SLM-SCMA 技术的 ACO-OFDM 系统 PAPR 分别为 11.82 dB、7.02 dB。

关键词:可见光通信;非对称限幅光正交频分复用;稀疏码分多址;选择性映射;峰值平均功率比

中图分类号:TN929.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2021)10-0048-03

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.10.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Performance analysis of ACO-OFDM system based on SLM-SCMA technology

SONG Qiuyan¹, CHEN Genxiang², FENG Sujuan¹

(1. College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu Shandong 273165, China;

2. School of Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

Abstract: Aiming at the problem of high peak-to-average power ratio (PAPR) in asymmetrically limited optical orthogonal frequency division multiplexing (ACO-OFDM) systems, an uplink multiple access scheme that reduces PAPR is proposed, using selective mapping-sparse code division multiple access (SLM-SCMA) technology suppresses the PAPR of the ACO-OFDM system, and the performance of the ACO-OFDM system is simulated through Matlab software. The simulation results show that when the number of subcarriers $N=512$ and the CCDF value is 10^{-4} , the PAPR of the ACO-OFDM system without and with SLM-SCMA technology is 11.82 dB and 7.02 dB respectively.

Key words: visible light communication; asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing; sparse code multiple access; selective mapping; peak-to-average power ratio

0 引言

目前,可见光通信的高速发展仍然面临着一些限制因素,例如:发光器件辐射光源带宽窄、光电探测器在可见光频段灵敏度较低、收发天线体积过大^[1-2]、太阳光等强背景噪声干扰^[3]、水体环境复杂^[4-5]和多径效应等。其中,室内可见光通信链路的多径效应和阴影

效应会对信号传输速率造成很大影响^[6-7]。为解决多径效应引起的码间串扰问题,文献[8-9]采用了美国 Bell 实验室的 CHANG R W 提出的正交频分复用(OFDM)技术,但该技术会产生较大的峰值功率,峰均比(PAPR)过大,使信号产生畸变,系统性能降低。因此,必须通过一定方法来抑制信号的 PAPR。目前,降低 OFDM 系统 PAPR 的方法有:限幅压缩法^[10]、群智能算法优化 OFDM 符号的子载波相位^[11]、导频辅助选择性映射算法^[12]、预编码算法^[13]和限幅结合频率选择法^[14-15]等。

针对非对称限幅光 OFDM(ACO-OFDM)可见光通信系统中 PAPR 过高的问题,本文采用选择性映射-稀疏码分多址(SLM-SCMA)接入技术,提高 ACO-OFDM 系统性能。

收稿日期:2020-12-03。

基金项目:山东省重点研发计划项目(2019GGX101065)资助;曲阜师范大学引进人才科研启动项目(611701)资助。

作者简介:宋秋艳(1986—),女,2016 年获得北京交通大学博士学位,现任曲阜师范大学讲师,主要从事无线光通信、光纤激光器和非线性光学材料等方面的研究工作。在相关领域以第一作者发表论文 5 篇,参与申请发明专利 14 项。



1 基于 SLM-SCMA 技术的 ACO-OFDM 系统

1.1 SLM 降低系统 PAPR 原理

SLM 是一种降低 PAPR 的概率类技术,其原理是通过多个相位不同的序列来传输同一组信息,在分别进行逆傅里叶变换(IFFT)之后,从中选择 PAPR 最小的一路用于信息传输。设置 k 个长度为 N 的随机相位矢量 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k$ 分别与要发送的频域样值 S 进行点乘,得到 k 个不同的输出序列 $S_1, S_2, \dots, S_k$ 。对输出序列 $S_1, S_2, \dots, S_k$ 分别进行 IFFT 计算,对应得到 k 个不同的实数输出序列 $s_1, s_2, \dots, s_k$ 。相位矢量不同导致每一路的 PAPR 不同,从 k 个携带相同信息的 OFDM 信号中选择一个 PAPR 最小的输出。SLM 原理框图如图 1 所示。

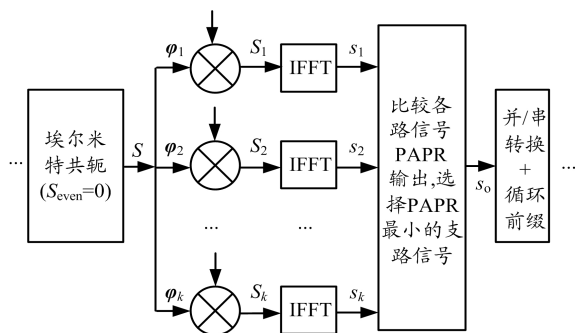


图 1 SLM 原理框图

一个 OFDM 信号 PAPR 超过门限值的概率为 $P\{PAPR > a\} = 1 - (1 - e^{-a})^N$, 采用 SLM 算法之后, k 个 OFDM 信号 PAPR 都超过门限值的概率为:

$$\{P\{PAPR > a\}\}^k = [1 - (1 - e^{-a})^N]^k \quad (1)$$

其中, a 为给定 PAPR 门限值, N 为子载波个数, k 表示 SLM 技术中支路数量。由式(1)可见, SLM 算法使信号峰值出现的概率降低, 且随着 k 增大而降低, 同时又不会对信号产生畸变。

1.2 SCMA 降低系统 PAPR 原理

由于 OFDM 多址接入的用户数小于/等于子载波的数目, 因此不能满足 6G 大容量、海量连接的需求; 在 OFDM 基础上引入码分多址(CDMA), 且当用户数量过大时会出现多址干扰, 导致系统性能下降。为了使系统在用户过载状态下保持良好的性能, 本文在 OFDM 基础上引入 SCMA。

SCMA 技术的关键是低密度扩频和多维度调制。首先通过星座映射将用户二进制比特信息变成多维度调制符号, 然后采用稀疏扩频矩阵和 SCMA 系统码本将多维度调制符号映射为 SCMA 码字, 以实现在 SCMA 中的每个子载波上叠加多个用户数据。由于每个用户可以占用多个子载波, 在相同频谱资源的条件

下能容纳更多用户, 因此, 大大提高了频谱利用率。基于 SCMA 技术的 ACO-OFDM 系统模型如图 2 所示。

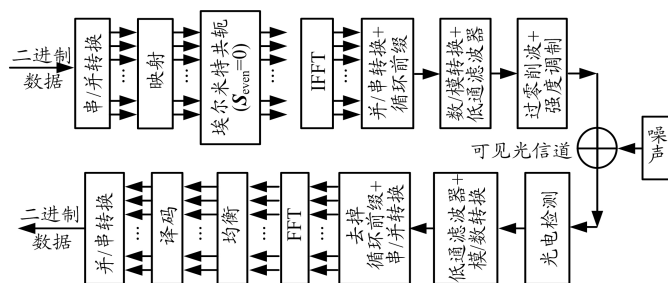


图 2 基于 SCMA 技术的 ACO-OFDM 系统

在发送端, 系统为每个用户分配一个 SCMA 码本, 用户的二进制比特信息映射为码本中的稀疏码字, 然后进行资源映射, 使多个用户的码字在相同的频谱资源上进行非正交叠加。在接收端, 系统根据码本的稀疏特性进行多用户检测。

基于 SCMA 技术的 ACO-OFDM 系统采用过载因子衡量 SCMA 技术对系统容量的影响, 过载因子表示为:

$$\eta_{SCMA} = \frac{C_u^V}{U} = \frac{U!}{U \cdot V! \cdot (U-V)!} \quad (2)$$

其中, 系统中总的用户数为 C_u^V , U 为频率资源数, V 为 SCMA 稀疏码字中非零元素个数。

SCMA 系统中也存在 CDMA 系统固有的多址干扰。假设基站接收到的用户功率为 P_s , 信道噪声功率为 P_n , 信道噪声功率和其它用户功率之和为 P_I , 系统中总的用户数为 C_u^V , 每个频率资源上的用户数为 $C_u^V \cdot V/U$, 则 SCMA 系统的多址干扰为:

$$\frac{P_s}{P_I} = \frac{P_s}{C_u^V \cdot V/U} \quad (3)$$

$$P_n + \sum_{i=2} P_i$$

其中, P_i 为基站接收到的其它用户的功率。当过载因子大于 1 时, 系统容量虽然有所提升, 但同时会使系统信噪比降低, 对误码率产生影响。

2 仿真结果及分析

本文应用 Matlab 软件对所提方案进行仿真, 仿真参数设置为: SLM 支路数为 5, SCMA 系统为 6-4 系统 (即 6 个用户共同占用 4 个子载波), 各路子载波的调制方式为 16 进制的正交幅度调制(16QAM), 循环前缀设置为 OFDM 符号长度的 1/4, 系统信噪比为 30 dB。然后, 分别对 OFDM、SLM、SCMA 和 SLM-SCMA 这 4 种系统的 PAPR 的互补累积分布函数(CCDF)进行仿

真分析,以确定不同 OFDM 系统的 PAPR,从中选出可以降低系统 PAPR 的最佳多址方案。

假设系统传输 10^6 个 OFDM 符号,采用 4 个相位生成 5 个随机相位矢量,每个矢量的长度为 128。4 种系统 PAPR 的仿真结果如图 3(a)所示。可以看出,当 CCDF 值为 10^{-4} 时,OFDM、SLM、SCMA 和 SLM-SCMA 的系统 PAPR 分别为 11.27 dB、8.12 dB、9.54 dB 和 6.13 dB。仿真结果表明:在相同的频谱资源和用户数目的情况下,SLM-SCMA 技术抑制 PAPR 的性能更好。但是,SLM 技术需要进行 k 次 IFFT,SCMA 技术需要采用消息传递算法进行多用户检测,所以 SLM-SCMA 系统相比 OFDM 系统的计算量会增加。

若子载波数为 512,4 种系统 PAPR 的 CCDF 仿真结果如图 3(b)所示。可以看出,当 CCDF 值为 10^{-4} 时,OFDM、SLM、SCMA 和 SLM-SCMA 的系统 PAPR 分别为 11.82 dB、8.97 dB、10.04 dB 和 7.02 dB。仿真结果表明:随着子载波数的增长,当 $N=512$ 时的系统抑制 PAPR 性能相比 $N=128$ 时有所下降,说明子载波数越大,系统抑制 PAPR 的性能越差。

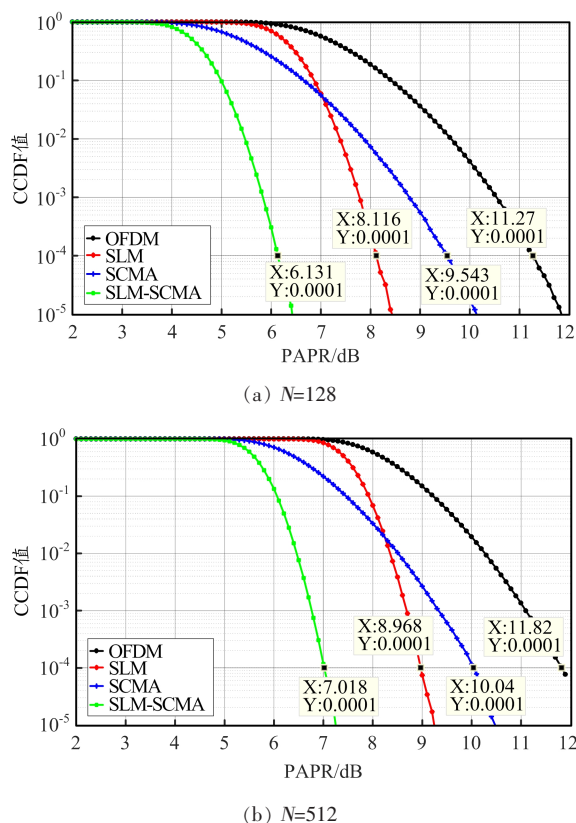


图 3 相同系统容量时 4 种系统的 PAPR 对比

3 结束语

室内可见光通信的多径效应对信号的传输速率

造成了很大影响,在可见光通信系统中引入 OFDM 技术会产生较大的 PAPR。本文在 OFDM 的基础上,采用 SLM-SCMA 技术抑制系统 PAPR,并通过 Matlab 软件对 OFDM、SLM、SCMA 和 SLM-SCMA 这 4 种系统的 PAPR 性能进行仿真分析,结果表明:SLM-SCMA 系统的抑制 PAPR 性能最优,OFDM 系统最差。因此,基于 SLM-SCMA 技术降低 PAPR 的多址方案能有效提升 ACO-OFDM 系统的性能,可以应用在功率放大器的线性区域比较小的系统中。

参考文献:

- [1] 夏中金,凌六一,黄家伟,等.可见光通信 LED 高速驱动电路研究与设计[J]. 光通信技术,2019,43(2):22-26.
- [2] 张琦,岳殿武.室内 MIMO ACO-OFD 可见光通信系统接收机设计[J]. 中国激光,2020,47(1):0106001-1-0106001-10.
- [3] 徐正元,刘伟杰.室外可见光通信抗干扰收发技术[J]. 光通信技术,2020,44(7):1-6.
- [4] CHI N, ZHAO Y H, SHI M, et al. Gaussian kernel-aided deep neural network equalizer utilized in underwater PAM8 visible light communication system[J]. Optics Express, 2018, 26(20): 26700-20712.
- [5] 朱义君,王超,汪涛,等.水下单光子可见光通信技术研究[J]. 光通信技术,2020,44(6):1-5.
- [6] DISSANAYAKE S D, ARMSTRONG J. Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD Systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(7): 1063-1072.
- [7] 贾科军,郝莉,张守琴.可见光通信非对称限幅光多载波码分多址系统的设计及性能分析[J]. 光学学报,2019,39(2):206001-1-206001-12.
- [8] WANG J H, XU Y, LING X T, et al. PAPR analysis for OFDM visible light communication[J]. Optics Express, 2016, 24(24): 27457-27474.
- [9] 宋小庆,王慕煜,邢松,等.可见光通信 OFDM 系统 PAPR 抑制技术研究进展[J]. 光通信技术,2019,43(12):1-6.
- [10] TANG B, QIN K Y, ZHANG X Y, et al. A clipping-noise compression method to reduce PAPR of OFDM signals [J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(8): 1389-1392.
- [11] 刘剑飞,王少影,曾祥焯,等.基于群智能算法的光 OFDM 系统 PAPR 抑制[J]. 光学学报,2017,37(1):0106006-1-0106006-8.
- [12] 倪伟隆,郑玉甫,冯楚滢.导频辅助降低 PAPR 技术在光正交频分复用通信系统中的应用 [J]. 激光与光电子学进展,2019,56(14): 140601-1-140601-7.
- [13] HSU C Y, LIAO H C. Generalised precoding method for PAPR reduction with low complexity in OFDM systems [J]. IET Communications, 2018, 12(7): 796-808.
- [14] LIU X R, ZHANG X Y, XIONG J, et al. An enhanced iterative clipping and filtering method using time-domain kernel matrix for PAPR reduction in OFDM systems[J]. IEEE Access, 2019(7): 59466-59476.
- [15] GÖKCELI S, LEVANEN T, RIIHONEN T, et al. Frequency-selective PAPR reduction for OFDM [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 1-5.