

降低可见光通信 OFDM 系统峰均比的 SLM 改进算法

秦岭, 于利强, 郭瑛, 徐艳红, 胡晓莉*

(内蒙古科技大学 信息工程学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 针对传统选择性映射(C-SLM)算法存在计算复杂度高的问题, 提出了分组(G-SLM)的改进算法, 在不增加系统计算复杂度的情况下, 将时域备选信号的个数从 M 增加到 $M^2/4$, 并且通过仿真确定了最佳的 α 值; 针对 C-SLM 算法存在峰均功率比(PAPR)抑制性能有限的问题, 将 G-SLM 算法与 μ -law 压缩扩展法相结合, 提出了 μ -GSLM 联合算法, 进一步降低了系统 PAPR。仿真结果表明: 在互补累计分布函数(CCDF)取值为 10^{-3} 时, 与原始信号、G-SLM 算法和 μ -law 压缩扩展法相比, μ -GSLM 算法的 PAPR 分别降低了 7.5 dB、3.2 dB 和 2.1 dB。

关键词: 可见光通信; 正交频分复用; 峰值平均功率比; 选择性映射; 计算复杂度

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2021)04-0032-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.04.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



SLM improvement algorithm for reducing peak-to-average ratio in OFDM systems for visible light communications

QIN Ling, YU Liqiang, GUO Ying, XU Yanhong, HU Xiaoli*

(School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia 014010, China)

Abstract: Aiming at the high computational complexity of traditional selective mapping (C-SLM) algorithm, an improved group (G-SLM) algorithm is proposed. Without increasing the computational complexity of the system, the number of time-domain candidate signals is increased from M to $M^2/4$, and the optimal α value is determined by simulation. In view of the limited peak-to-average power ratio (PAPR) suppression performance of C-SLM algorithm, a μ -GSLM joint algorithm is proposed by combining G-SLM algorithm with μ -law compression expansion method, which further reduces the PAPR of the system. The simulation results show that when complementary cumulative distribution function (CCDF) is 10^{-3} , the PAPR of μ -GSLM algorithm is reduced by 7.5 dB, 3.2 dB and 2.1 dB respectively compared with the original signal, G-SLM algorithm and μ -law compression expansion method.

Key words: visible light communications; orthogonal frequency division multiplexing; peak-to-average power ratio; selective mapping; computational complexity

收稿日期: 2020-09-18。

基金项目: 国家自然科学基金(61961033)资助; 内蒙古自然科学基金(2019MS06021, 2019LH06005)资助; 内蒙古自治区高等学校“青年科技英才支持计划”(NJYT-19-A15)资助。

作者简介: 秦岭 (1979—), 女, 内蒙古包头人, 博士, 教授, 硕士生导师。主要研究方向为基于 LED 的收发系统相关技术、定位技术和编解码、调制/解调技术等, 主持和参加国家自然科学基金、内蒙古自然科学基金等各类科研项目共 20 余项, 获得国家发明专利 10 项, 以第一作者或合作作者发表核心以上论文 40 多篇。现主要担任国家自然科学基金评审专家, 《中国激光》、《光学学报》、《激光与光电子学进展》和《光通信技术》等国内知名期刊的审稿专家, 多次参加国际学术会议并担任委员。

* 通信作者: 胡晓莉 (E-mail: huxiaoli@imust.edu.cn)。



0 引言

近年来, 随着无线数据的不断增长, 传统射频通信频谱资源接近饱和。可见光通信(VLC)具有设备成本低、保密性强、不受无线电频谱管制和无电磁干扰等优点, 迅速成为解决无线频谱资源紧缺问题的一种新型方案^[1]。为了提高 VLC 系统的数据传输速率、抑制因多径效应引起的码间干扰并且提高频谱利用率, 正交频分复用(OFDM)技术在 VLC 系统中得到了广泛应用^[2]。然而, OFDM 作为一种多载波调制信号, 在进行快速傅里叶逆变换(IFFT)的过程中可能会出现某些子载波同相叠加的情况, 导致经过 IFFT 之后的信号出现较高的峰值平均功率比(PAPR)^[3]。高 PAPR 信号在经过

LED 的非线性区域时,会引起非线性失真,导致系统性能严重下降,最终对 OFDM 技术在可见光通信中的应用产生不利影响^[4]。

常见的 PAPR 抑制技术可分为信号预畸变类技术、概率类(加扰类)技术以及编码类技术^[5]。其中,概率类技术因其不会导致误码性能的降低,引起学者们的广泛关注,主要有选择性映射(SLM)^[6]、部分传输序列(PTS)^[7]、音频保留(TR)^[8]和音频注入(TI)^[8]等技术。Zhang Hua 等人^[9]提出了将半定松弛方法应用于音频注入的峰均比降低方法中,该方法在考虑发光二极管非线性的情况下,使 PAPR 显著降低。Doblado 等人^[10]提出了在 VLC 的发射机上应用一种基于有源星座扩展方法的 PAPR 降低技术,最高降低 7.1 dB。针对 SLM 方法需要传输边带信息的问题,Valluri 等人^[11]提出一种利用导频和信道估计相结合的方法来消除边带信息,实现了边带信息抵消的同时降低了 PAPR。这些学者所提出的方法虽然可以有效地降低系统的 PAPR,但是并未从根本上考虑系统计算复杂度的问题,而复杂度高也是概率类技术中存在的一个有待解决的问题。其中,传统的 SLM(C-SLM)技术虽可以有效地降低系统的 PAPR 并且不引起误码率的增加,但是每组信号必须分别进行 IFFT 调制,这增加了系统的计算复杂度,且随着备选信号个数的增加,系统的计算复杂度也相应地增加^[12]。

为此,本文提出一种分组 SLM(G-SLM)的改进算法,并且针对 C-SLM 算法降低 PAPR 能力有限的问题,将 G-SLM 算法结合 μ -law 压扩变换技术,又提出 μ -GSLM 联合算法,进一步降低系统的 PAPR。

1 C-SLM 算法

C-SLM 算法属于概率类技术的一种,它对输入 OFDM 的原始信号进行加扰处理,并发射其中具有最小 PAPR 的信号,从而降低高 PAPR 出现的概率,以此来降低系统的 PAPR。该算法的原理框图如图 1 所示^[13],其核心思想是将经过符号映射之后的频域信号分别与不同的相位旋转因子相乘,产生包含同一信息的 M 组

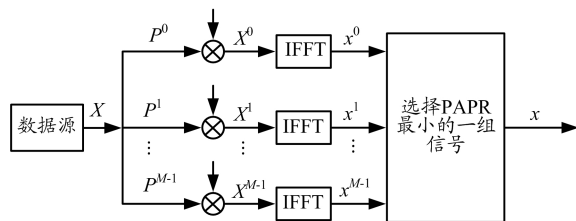


图 1 C-SLM 算法原理框图

不同的备选信号,从中选取 PAPR 最小的一组信号进行传输。

该算法的具体实现步骤如下:

步骤一:原始的二进制比特经过符号映射和串/并转换之后,分别与 M 组不同的相位旋转序列 P 点乘,得到 M 组相互独立的向量,即:

$$\begin{aligned} X^m &= [X^m(0), X^m(1), \dots, X^m(N-1)] = \\ X \cdot P^m &= [X(0)P^m(0), X(1)P^m(1), \dots, \\ &X(N-1)P^m(N-1)], 0 \leq m \leq M-1 \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $P^m(i) = \exp(j\varphi_i^m)$ 表示第 m 组相位旋转序列, φ_i^m 在 $[0, 2\pi]$ 内服从均匀分布, X 表示原始数据信号, N 表示子载波的个数。

步骤二:对经过与相位旋转序列相乘之后的信号 X^m 进行 IFFT 生成 M 组时域备选信号 x^m , 即:

$$x^m = \text{IFFT}(X^m) = \text{IFFT}(X \cdot P^m), 0 \leq m \leq M-1 \quad (2)$$

步骤三:在限定门限值的情况下,从 M 组备选信号 x^m 中选择 PAPR 最小的一组信号进行传输,以此来降低系统的 PAPR。

图 2 为可见光通信 OFDM 系统在不同 M 取值条件下 C-SLM 算法的 PAPR 仿真曲线图。可以看出,随着备选信号个数的增加, PAPR 的抑制性能呈现增加的趋势,但是增加的趋势随着备选信号个数的增加而逐渐趋于缓慢,说明 C-SLM 方法抑制 PAPR 的性能有一定的局限性,需要结合其它方法进一步降低 PAPR。

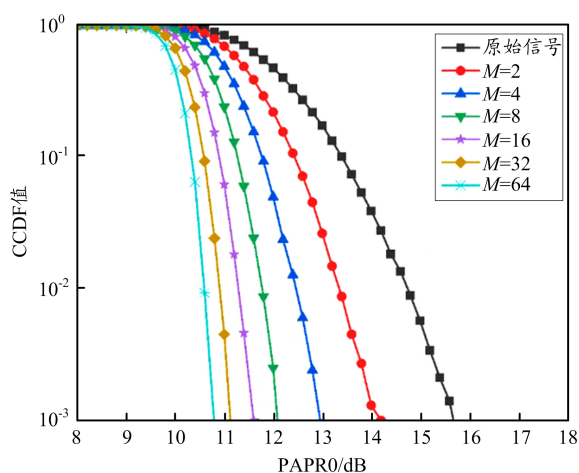


图 2 不同 M 取值下, C-SLM 算法的 PAPR 仿真曲线图

2 C-SLM 的改进算法

2.1 G-SLM 算法

为了有效地降低系统的 PAPR, C-SLM 算法一般需要生成多组备选信号, 其降低 PAPR 的能力随着备

选信号个数的增加而增加。但是,每生成一组备选信号,就需要进行一次 IFFT 运算,因此 C-SLM 算法中的多次 IFFT 运算将增加系统的计算复杂度。基于此,本文提出一种 C-SLM 的改进算法—G-SLM 算法,该算法的原理框图如图 3 所示。首先,将经过 IFFT 运算之后的备选信号平均分成 2 组;然后,将前一组信号分别乘以 $\sin\alpha$,后一组信号分别乘以 $\cos\alpha$,这样在组合的过程中保证了功率的归一化^[14];最后,通过将 2 组信号进行线性组合,在不增加 IFFT 运算的前提下,增加了备选信号的个数,从而降低了系统复杂度。

设 P^m 和 P^n 分别为 G-SLM 算法中前一组和后一组信号中的某一个相位旋转矢量,它们对应的时域信号分别为 x^m 和 x^n ,即:

$$x^m = \text{IFFT}(X \cdot P^m) \quad (3)$$

$$x^n = \text{IFFT}(X \cdot P^n) \quad (4)$$

将 x^m 与 x^n 进行线性组合,即:

$$x^{(m,n)} = \sin\alpha \cdot x^m + \cos\alpha \cdot x^n \quad (5)$$

针对 2 组信号中的任意 2 个 m 和 n 值,都可以将 x^m 和 x^n 进行式(5)所示的线性组合,生成一个新的时域备选信号 $x^{(m,n)}$,并且针对不同的 α 值,将会产生不同的 PAPR 降低性能。依次选择不同的 α 值进行仿真验证,从中选取最佳的 α 值以得到最好的 PAPR 抑制性能。针对某一个固定的 α 值,当 C-SLM 算法的备选信号组数是 M 时,G-SLM 算法可以产生 $M^2/4$ 组备选信号,有效地降低了系统的 PAPR。

2.2 压缩扩展变换

C-SLM 算法虽可以有效地抑制 PAPR,但是抑制 PAPR 的性能有一定的局限性,即当备选信号的个数增加到一定的程度时,C-SLM 算法对 PAPR 的抑制能力将变得缓慢。基于此,本文将在 G-SLM 算法的基础上结合压缩扩展变换技术,进一步降低系统的 PAPR。

压缩扩展变换属于信号畸变类方法,其原理框图

如图 4 所示^[15]。该技术的原理是在发送端将经过 IFFT 之后的信号中的高峰值信号进行压缩,同时将小信号进行扩大,使信号的总功率保持基本不变,在接收端进行相应的反压扩变换恢复原始发送信号。压扩变换不仅可以有效降低系统的 PAPR,还可以增强小信号的抗干扰能力。

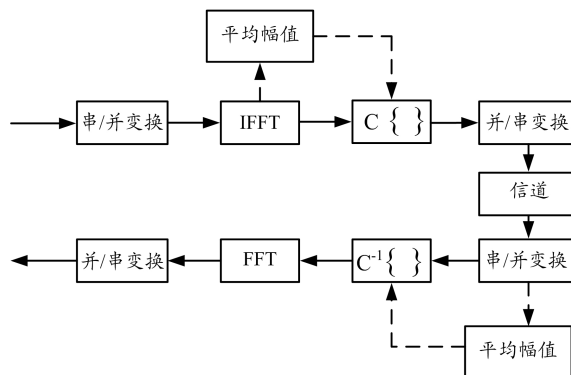


图 4 压扩变换原理框图

图 4 中, $C\{\}$ 和 $C^{-1}\{\}$ 分别代表压扩与反压扩函数。压扩变换中最常用的是 μ -law 压扩,其压扩函数与反压扩函数^[16]分别如式(6)、式(7)所示。

$$s(n) = \frac{A \operatorname{sgn}(x(n)) \ln(1 + \mu |x(n)/A|)}{\ln(1 + \mu)} \quad (6)$$

$$y(n) = \frac{A' \operatorname{sgn}(r(n)) \left[\exp\left(|r(n)| \frac{\ln(1 + \mu)}{A'}\right) - 1 \right]}{\mu} \quad (7)$$

其中, A 和 A' 分别为发送端和接收端信号的平均幅值, μ 为压扩系数, $s(n)$ 为发送端经过压扩变换之后的信号, $y(n)$ 为接收端经过反压扩变换之后的信号, $x(n)$ 表示发送端经 IFFT 变换之后的时域信号的值, $r(n)$ 表示接收端接收到的时域信号的值。

图 5 为不同压扩系数条件下, μ -law 压扩变换的 PAPR 仿真图。可以看出,使用 μ -law 压扩可以明显地降低系统的 PAPR,且随着 μ 值的增大,该方法对 PA-

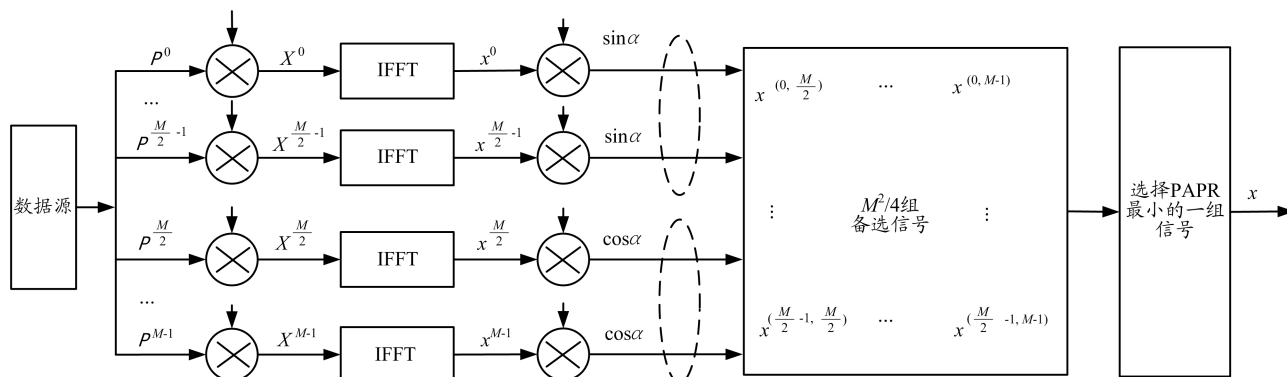
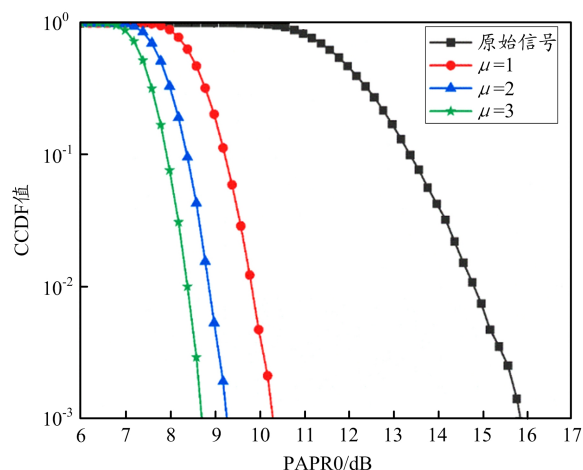


图 3 G-SLM 算法原理框图

图5 不同 μ 取值下, μ -law 压扩变换的 PAPR 仿真曲线图

PR 的抑制性能越明显。由于压缩扩展变换属于信号畸变类技术,在变换过程中对信号进行了非线性操作,会引起误码率的上升,且随着压扩系数的增大,对误码性能的影响也随之增大。因此,为防止误码率过大影响系统性能,在结合压扩变换时,应该在 PAPR 抑制性能和误码性能之间做良好的折中。

2.3 压扩变换与 G-SLM(即 μ -GSLM)联合算法

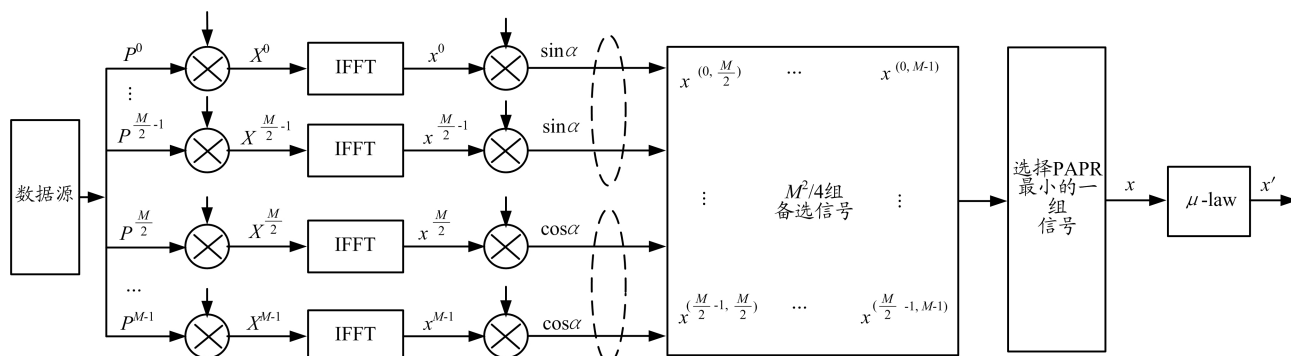
μ -GSLM 联合算法的原理框图如图 6 所示,其基本原理是通过 G-SLM 算法降低系统的 PAPR,在选取出最小 PAPR 的一组信号之后,再对该信号进行 μ -law 压缩扩展变换,进一步降低系统的 PAPR。

该算法的具体实现步骤如下:

步骤一:对原始的二进制比特进行星座映射,然后将映射之后的信号 X 做串/并变换,生成 M 组相同的信号。

步骤二:将 M 组信号分别与 M 个相位旋转因子点乘,生成 M 组包含同一信息的备选信号。

步骤三:将 M 组备选信号分别进行厄米特对称变换,然后进行 IFFT 运算,生成 M 组时域信号 x^m ,并且将该 M 组时域信号平均分成 2 组,即:

图6 μ -GSLM 算法原理框图

$$\begin{cases} x^m(k)=x(k), 0 \leq m \leq M/2-1 \\ x^n(k)=x(k), M/2 \leq n \leq M-1 \end{cases} \quad (8)$$

步骤四:将 x^m 和 x^n 进行线性组合,生成 $M^2/4$ 组新的时域备选信号 $x^{(m,n)}$,并且从中选取 PAPR 最小的一组信号 x 。

步骤五:对步骤四选出的信号 x 进行 μ -law 压缩扩展变换,生成信号 x' ,然后将该信号送入信道中进行传输。

3 系统性能分析

3.1 系统复杂度

OFDM 系统中的计算复杂度主要由系统所需 IFFT 的次数所决定,IFFT 的次数决定了运算过程中所需的复数乘法和复数加法的个数。当子载波个数为 N 时,进行一次 IFFT 运算,需要 $N/2 \log_2 N$ 次复数乘法和 $N \log_2 N$ 次复数加法运算。为了验证 G-SLM 算法相比于 C-SLM 算法有效降低了计算复杂度(由于从 G-SLM 到 μ -GSLM 不增加 IFFT 运算的个数,因此 G-SLM 和 μ -GSLM 的复杂度一样,故本文只比较 C-SLM 和 G-SLM 算法的计算复杂度),本文对这 2 种方法产生 $M^2/4$ 组备选信号所需的复数乘法及复数加法运算作比较,比较的结果如表 1 所示。

表1 C-SLM 算法与 G-SLM 算法计算复杂度比较

PAPR 抑制算法	复杂度计算方法	
	复数乘法	复数加法
C-SLM	$\frac{M^2 N}{8} \log_2 N$	$\frac{M^2 N}{4} \log_2 N$
G-SLM	$\frac{M N}{2} \log_2 N$	$M N \log_2 N$

此外,为了进一步验证 G-SLM 算法相比于 C-SLM 算法计算复杂度降低的程度,本文定义了计算复杂度降低率(CRR),即:

$$CCRR = \left(1 - \frac{\text{G-SLM 计算复杂度}}{\text{C-SLM 计算复杂度}}\right) \times 100\% \quad (9)$$

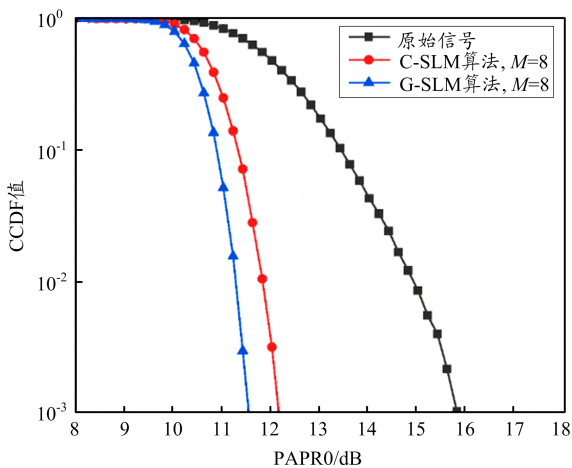
式(9)中的计算复杂度是指 IFFT 中所需复数乘法与复数加法运算的个数之和。设定子载波数 $N=256$, 备选信号个数 M 的值分别为 32 和 64 时, G-SLM 算法与 C-SLM 算法的相对计算复杂度降低率如表 2 所示。可以看出, 在子载波个数一定的情况下, 当生成相同个数的备选信号时, G-SLM 算法计算复杂度明显降低, 并且随着备选信号个数的增加, 计算复杂度降低越明显。

表 2 G-SLM 和 C-SLM 算法计算性能对比

备选信号的个数	复杂度		CCRR
	C-SLM 算法	G-SLM 算法	
32	786432	98304	87.5%
64	314728	196608	93.75%

3.2 PAPR 抑制性能

为了验证所提算法对 PAPR 的抑制性能, 本文使用 Matlab 仿真软件对 G-SLM 与 μ -GSLM 2 种算法进行仿真验证。仿真过程采用正交振幅调制(QAM), 选定调制阶数为 16, 子载波个数为 256。当备选信号个数设定为 8 时, C-SLM 算法与 G-SLM 算法的 PAPR 抑制性能如图 7 所示。

图 7 $M=8$ 时, C-SLM 与 G-SLM 算法的 PAPR 仿真曲线图

从图 7 可知, C-SLM 算法与 G-SLM 算法均能有效地降低 PAPR。当备选信号的个数一定时, G-SLM 算法的 PAPR 抑制性能优于 C-SLM 算法。当 CCDF 取值为 10^{-3} 时, 与原始信号相比, G-SLM 算法的 PAPR 降低了约 4.4 dB; 与 C-SLM 算法相比, G-SLM 算法在不增加计算复杂度的情况下 PAPR 降低了约 0.6 dB。这表明 G-SLM 算法改进了系统性能。

为了进一步确定 G-SLM 算法中不同 α 取值对 PAPR 的抑制性能, 本文选定式(5)中的最优 α , 分别选取了 6 个不同的值进行仿真验证。仿真过程同样设定子载波数为 256, 备选信号个数为 8, α 取值分别为 $\pi/12$ 、 $\pi/10$ 、 $\pi/8$ 、 $\pi/6$ 、 $\pi/4$ 和 $\pi/2$ 。仿真结果如图 8 所示。可以看出, 不同 α 取值的 PAPR 抑制性能不同, 当 α 取值为 $\pi/4$ 时的 PAPR 抑制性能最优, 因此在 G-SLM 算法中本文选定 α 的取值为 $\pi/4$ 来获得最优的系统性能。

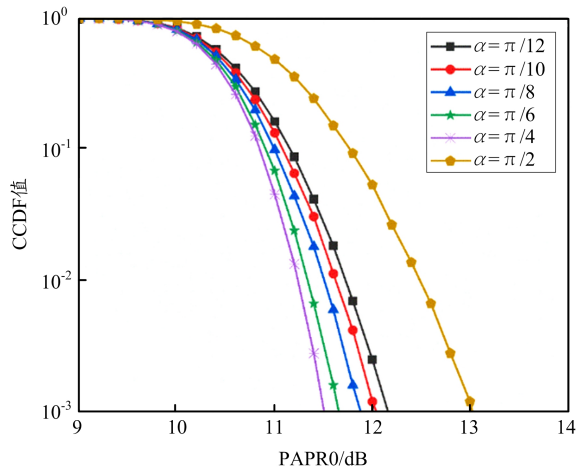
图 8 G-SLM 算法中不同 α 取值下 PAPR 仿真曲线图

图 9 为 μ -GSLM 联合算法、G-SLM 算法和 μ -law 算法压缩扩展法对 PAPR 抑制能力的仿真曲线图。仿真过程中为了折中考虑 PAPR 抑制性能与误码性能, 选定 μ 的值为 1, 并且同样设置子载波数为 256, 备选信号的个数为 8。可以看出, 虽然每种方法均能有效地降低 PAPR, 但在 CCDF 取值为 10^{-3} 时, 相比于原始信号, μ -GSLM 联合算法的 PAPR 降低了约 7.5 dB; 相比

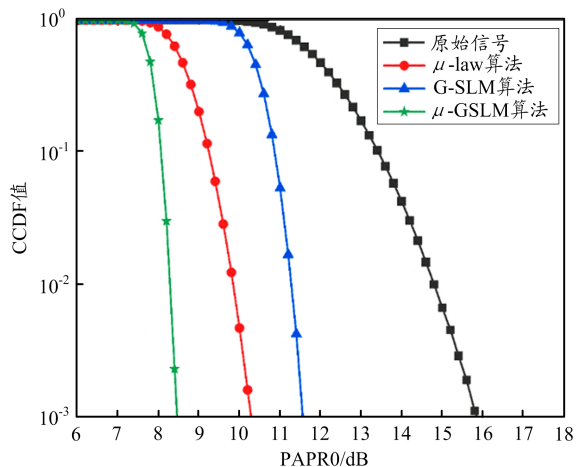


图 9 不同算法下 PAPR 仿真曲线图

于 G-SLM 算法和 μ -law 压缩扩展法, μ -GSLM 联合算法的 PAPR 分别降低了约 3.2 dB 和 2.1 dB。这验证了 μ -GSLM 算法的有效性。

4 结束语

针对 C-SLM 算法降低 PAPR 方案存在计算复杂度高的问题,提出一种 G-SLM 算法的改进方案,并且针对 C-SLM 算法降低 PAPR 能力有限的问题,又提出了将 μ -law 压缩扩展法与 G-SLM 算法相结合的 μ -GSLM 联合算法。仿真结果表明:相比于 C-SLM 算法,所提出的 μ -GSLM 联合算法能够有效地降低系统的 PAPR,且经过计算分析,该算法的计算复杂度也得到了有效的改善,随着备选信号个数的增加,改善的程度更加明显。

参考文献:

- [1] VAPPANGI S, MANI V V. Performance analysis of DST-based intensity modulated/direct detection (IM/DD) systems for VLC [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(4): 1320–1337.
- [2] 倪玮隆,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): 40–46.
- [3] 胡武君, 杨霖. MIMO-OFDM 系统中基于循环移位和信号联合的改进 SLM 算法[J]. 通信学报, 2015, 36(4): 174–181.
- [4] HU W. PAPR reduction in DCO-OFDM visible light communication systems using optimized odd and even sequences combination [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(1): 1–15.
- [5] 白菊蓉. OFDM 系统峰均比抑制技术与应用研究[D]. 西安:西北工业大学, 2018.
- [6] WEI H. SLM-based ACO-OFDM VLC system with low-complexity minimum amplitude difference decoder [J]. ELECTRONICS LETTERS, 2018, 54(3): 144–146.
- [7] LU H, HONG Y, CHEN L, et al. On the study of the relation between linear/nonlinear PAPR reduction and transmission performance for OFDM-based VLC systems [J]. Optics Express, 2018, 26 (11): 13891–13901.
- [8] RAHMATALLAH Y, MOHAN S. Peak-to-average power ratio reduction in OFDM systems: a survey and taxonomy [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(4): 1567–1592.
- [9] ZHANG H, YUAN Y, XU W. PAPR reduction for DCO-OFDM visible light communications via semidefinite relaxation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(17): 1718–1721.
- [10] DOBLADO J G, ORIA A C O, BAENA-LECUEYER V, et al. Cubic metric reduction for DCO-OFDM visible light communication systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(10): 1971–1978.
- [11] VALLURI S P, KISHORE V, VAKAMULLA V M. A new selective mapping scheme for visible light systems [J]. IEEE Access, 2020 (8): 18087–18096.
- [12] MESTDAGH D J G, MONSALVE J L G, BROSSIER J M. Green OFDM: a new selected mapping method for OFDM PAPR reduction[J]. Electronics Letters, 2018, 54(7): 449–450.
- [13] HU W, LEE D. PAPR reduction for visible light communication systems without side information [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1–11.
- [14] 赵瑶,王翀,杨宏,等. 改进的可见光通信系统 SLM 峰均比抑制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(4): 916–920.
- [15] 孙益. OFDM 可见光通信中改善非线性失真的理论与方法研究[D]. 长沙:中南大学, 2013.
- [16] 陈虹先,陈林,余建军,等. 基于压扩变换的 60 GHz 正交频分复用光载无线通信系统实验研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 30–35.