

# 降低 OFDM 系统复杂度的改进 SLM 算法

季 策, 贾佃霞, 张 超, 祝雯靖  
(东北大学 计算机科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110169)

**摘 要:** 为了降低正交频分复用 (OFDM) 系统中传统选择性映射 (SLM) 算法的计算复杂度, 提高系统的频谱利用效率, 提出了基于转换向量 (conversion vectors) 与随机筛选序列 (random selection sequences) 相结合的选择性映射 (CR-SLM) 算法. CR-SLM 算法是将原始信号序列等分, 然后对于数据序列的前半部分与转换向量相乘进行循环卷积, 对于数据序列后半部分进行随机序列筛选, 筛选出最优序列. 最后将两部分输出序列合并生成候选序列, 筛选出最优序列进行传输. 仿真结果表明: CR-SLM 算法在保持与传统 SLM 算法 PAPR 性能相近的情况下, 较大幅度降低了计算复杂度.

**关 键 词:** 正交频分复用; SLM 算法; 转换向量; 随机筛选序列; 峰均功率比

**中图分类号:** TN 929.53      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2018)05-0619-05

## Improved SLM Algorithm for Reducing OFDM System Complexity

Ji Ce, JIA Dian-xia, ZHANG Chao, ZHU Wen-jing  
(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China. Corresponding author: JIA Dian-xia, E-mail: jiadianxia\_neu@163.com)

**Abstract:** In order to reduce the computational complexity of the traditional selective mapping (SLM) algorithm in OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) systems, and improve the spectral efficiency of the system, a CR-SLM algorithm based on the combination of conversion vectors and random selection sequences was proposed. In this algorithm, the data sequence is equally divided into two parts. For the first half of the data sequence IFFT (inverse fast Fourier transform) is taken, and then circular convolution is performed. Random sequence screening is applied for the second half section to reduce the complexity. Finally, the two output sequences are grouped together to generate candidate sequences, and the optimal sequence is selected for transmission. The simulation results show that the CR-SLM algorithm greatly reduces the computational complexity while maintaining the PAPR (peak to average power ratio) close to that of the conventional SLM algorithm.

**Key words:** orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); SLM algorithm; conversion vector; random selection sequence; peak to average power ratio (PAPR)

OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 即正交频分复用技术<sup>[1]</sup>, 实际上 OFDM 是 MCM (multi carrier modulation) 多载波调制的一种, 因为其具有较高的频谱利用率、良好的网络结构可扩展性和抗多径干扰能力强等优点得到了普遍应用. 但是, OFDM 信号是由不同振幅、不同频率的多个子载波信号进行叠加成的, 因此会产生很高的峰均功率比<sup>[2]</sup> (PAPR). 而 PAPR 过大, 则其对线性高功率放大器线性放大的要求也会相应地提高, 从而使系统的实现难度和造价大大增加, 同时也使得射频功率放大器的效率大幅降低. 因此, 学者们从多方面进行研究与分析, 提出了一些有效降低 PAPR 的方法.

目前, 降低 OFDM 系统 PAPR 的方法一般分为 3 大类<sup>[2]</sup>: 编码类、概率类和限幅类. 在文献 [3] 中使用了限幅滤波的方法, 限幅滤波是直接对信号的幅度进行限制, 是降低 PAPR 最直接的方法. 但是此方法在限制信号峰值的同时也会产

生带外频谱泄露和带内失真的问题. 文献[4]采用了编码类方法之一的子块编码(block coding)方法,但是此方法的带宽效率和编码率比较低,而且当子载波数目大幅增加时,很难找到比较合适的码组. 选择性映射(selective mapping, SLM)与部分传输序列(partial transmit sequence, PTS)都属于概率类方法,它们能够较好地降低 PAPR 的性能. 但是,在传统的选择性映射方法中,要进行很多次的快速傅里叶反变换(inverse fast Fourier transform, IFFT)获得不同的候选信号,使得系统的计算复杂度较高,而且需要发送端发送额外的边带信息来解调出原始信号. 为了降低系统的计算复杂度,研究者们提出了一些改进的 SLM 算法,文献[5]中是通过先生成一些不同的序列组,然后将这些生成的序列组以最小互相关性的限制条件组合起来,从而将 PAPR 降低到 5dB 以内. 但是此方法中将生成序列进行组合的计算量较大. 文献[6]提出了一种 PTS 和 SLM 进行结合的方法,使得 PAPR 的降低效果比只使用其中一个方法要好. 但是,此方法的运算量与复杂度更大. 文献[7]提出了序列分块的方法,但是该方法对于分块序列使用传统 SLM 方法操作,只是减少了进行 IFFT 变换的序列的长度,没有减少其个数,仍然存在较大的计算复杂度.

本文对 SLM 算法进行了改进,提出了转换向量与随机筛选序列相结合的 CR-SLM 算法. 在本算法中首先将原始数据进行等分,对数据序列的前半部分进行循环卷积与循环移位操作,使系统能够获得更多的时域备选信号,保证系统的 PAPR 值不会很差. 对于数据后半部分使用随机筛选方法处理,筛选出最优的序列进行一次 IFFT 变换,从而减少 IFFT 变换的次数,达到降低系统计算复杂度的目的. 最后将两部分数据的输出进行组合得到最终的时域备选信号,选择其中 PAPR 值最小的序列进行传输. 本文提出的算法很大程度地减少了 IFFT 模块的个数,较大程度地降低了计算复杂度. 并且通过最后的仿真验证了 CR-SLM 算法在保持与传统 SLM 算法 PAPR 性能相近的情况下,较大幅度地降低了计算复杂度.

1 OFDM 系统原理

一个 OFDM 信号由一系列正交的子载波构成,若 OFDM 系统子载波个数为  $N$ ,使用  $X = \{X_0, X_1, \dots, X_{N-1}\}$  表示 OFDM 系统中的输入信号. 则用  $x = \{x_0, x_1, \dots, x_{N-1}\}$  表示 OFDM 时域信

号序列,因此 OFDM 信号序列  $x$  可表示为

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{LN}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi nk} \tag{1}$$

其中  $L$  为采样系数.

信号的峰均功率比 PAPR 的定义是信号的峰值功率与平均功率的比值. 其定义为

$$\text{PAPR} = 10\lg \frac{\max(|x_n|^2)}{E(|x_n|^2)} \tag{2}$$

其中:  $\max(|x_n|)^2$  表示信号功率的最大值;  $E(|x_n|^2)$  表示信号功率的平均值, PAPR 的单位为 dB.

通常情况下,使用互补累积分布函数<sup>[8]</sup>(CCDF)来描述 PAPR 的变化情况,CCDF 表示 OFDM 系统的峰均功率比超过某一个值的概率,其数学表达式:

$$P(\text{PAPR} > z) = 1 - P(\text{PAPR} \leq z) = 1 - (1 - \exp(-z))^N \tag{3}$$

2 传统 SLM 算法

传统的 SLM 算法<sup>[9]</sup>是概率类技术中一种性能较好的算法,是一种无失真地降低 PAPR 的算法,该算法的基本思想是通过引入较小的冗余来提高峰均功率比的统计特性. 此算法是将发送端的原始数据序列与  $M$  个统计独立的随机相位序列相乘产生多个候选信号,然后从产生的多个候选信号中,选择峰均功率比最小的候选序列进行传输. 为了使接收端能够正确解调出原始的输入信号,发送端需要将所有相位序列的信息发送到接收端. 本算法的原理框图如图 1 所示.

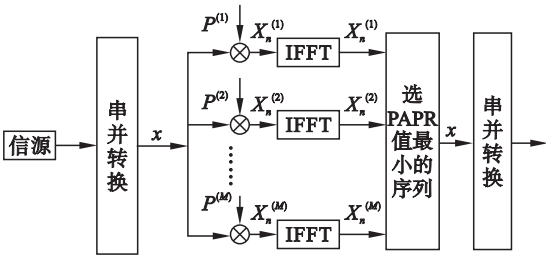


图 1 SLM 原理框图  
Fig. 1 Block diagram of the SLM method

设  $M$  个长度为  $N$  的独立相位序列:

$$P^{(\mu)} = (P_0^{(\mu)}, P_1^{(\mu)}, \dots, P_{N-1}^{(\mu)}) \tag{4}$$

式中:  $\mu = 0, 1, \dots, M-1$ ;  $P_i^{(\mu)} = \exp(j\varphi_i^{(\mu)})$ , 其中  $\varphi_i^{(\mu)}$  函数服从  $[0, 2\pi]$  内的均匀分布. 若将式(4)中的  $M$  个不同的随机相位向量分别与频域内的信号  $X$  进行点乘,则可得到  $M$  个唯一的输出序列  $X^{(\mu)}$ :

$$X^{(\mu)} = X \cdot P^{(\mu)} =$$

$$(X_0 \cdot P_0^{(\mu)}, X_1 \cdot P_1^{(\mu)}, \dots, X_{N-1} \cdot P_{N-1}^{(\mu)}). \quad (5)$$

然后对点乘运算之后得到的  $M$  个序列  $X^{(\mu)}$  分别进行 IFFT 变换, 则得到  $M$  个不同的输出序列  $(x_0^{(\mu)}, x_1^{(\mu)}, \dots, x_{N-1}^{(\mu)})$ . 从 IFFT 变换后的  $M$  个时域信号中选取 PAPR 最小的一组序列进行传输.

在这种传统的 SLM 算法中随着  $M$  值的增大, 系统的搜索次数和反傅里叶变换次数也会相应变大, 从而使得系统计算量呈现线性增长<sup>[10]</sup>. 为了在获取相似 PAPR 降低性能的基础上, 较大程度地降低系统计算复杂度, 本文提出了改进的 CR-SLM 算法.

### 3 CR-SLM 算法

传统的 SLM 算法原理图如图 1 所示, 首先是一个数据序列经过串并转换变成  $M$  个含有相同信息的数据序列, 然后进行相位序列加扰, 最后再单独进行 IFFT 变换成时域序列, 串并转换后的每一个序列都要进行一次长为  $LN$  的 IFFT 变换, 使得系统的计算复杂度成倍增长. 为减少计算复杂度, 将频域信号分为两部分, 每部分的长度为  $LN/2$ , 对于前半部分利用转换向量进行处理, 对于后半部分则使用随机筛选函数进行筛选.

在本文的随机筛选函数中涉及 4 个评判因子, 即随机性  $S_n$ 、震荡性  $T_n$  和自相关性  $W_{n,1}$ ,  $W_{n,2}$ , 来评判序列的好坏、优劣.

1) 随机性. 随机性越好的序列, 序列中  $-1$  与  $1$  的个数越接近.

$$S_n = \sum_{i=1}^{LN/2} X_{n,i}, 1 \leq n \leq M. \quad (6)$$

$|S_n|$  越小, 序列的随机性越好.

2) 震荡性. 将序列值的跳变次数累加后与  $1/2$  序列长度比较.

$$T_n = \sum_{i=1}^{LN/2} \left| \frac{X_{n,i+1} - X_{n,i}}{2} \right| - \frac{LN}{4}. \quad (7)$$

$|T_n|$  越小, 序列的随机性就越好.

3) 判断序列周期长短. 周期较短的序列峰均功率比较差, 对信号筛选的影响较大, 因此需要排除短周期序列的影响.

$$W_{n,1} = \sum_{i=1}^{N/2-2} X_{n,i} X_{n,i+2}, \quad (8)$$

$$W_{n,2} = \sum_{i=1}^{N/2-3} X_{n,i} X_{n,i+3}. \quad (9)$$

$W_{n,1}$  和  $W_{n,2}$  分别是序列非周期自相关函数  $R(\tau)$  在  $\tau=2, \tau=3$  时的取值函数. 当序列是短周

期时, 这两个自相关函数值会较大. 因此当它们的数值越小时, 序列是短周期序列的可能性就会越小.

利用以上 4 个评判因子根据式 (10) 构造随机筛选函数  $H_n$ :

$$H_n = \alpha_1 |S_n|^2 + \alpha_2 |V_n|^2 + \alpha_3 |W_{n,1}|^2 + \alpha_4 |W_{n,2}|^2. \quad (10)$$

$H_n$  越小, 则该序列的频谱越平坦, 峰均功率比越小. 评价函数中权重系数的选取在文献 [11] 中有详细描述, 当权重系数的取值分布为  $\alpha_1 = 0.12, \alpha_2 = 0.08, \alpha_3 = 0.35, \alpha_4 = 0.45$  时效果较好, PAPR 降低性能与传统 SLM 接近. 当不考虑权重系数的影响时,  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 1$ .

本文提出的 CR-SLM 算法的原理框图如图 2 所示.

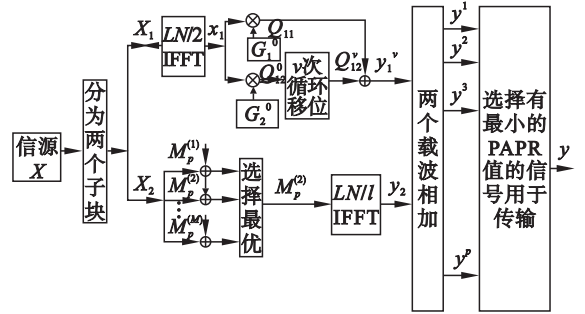


图 2 CR-SLM 算法原理图

Fig. 2 Block diagram of the CR-SLM algorithm

CR-SLM 算法具体的实现步骤如下:

1) 将频域信号序列划分为两个不相交的子块  $X_1, X_2$ , 使用过采样因子  $L$ , 在数据之间添加  $(L-1)N/2$  个零.

$$X_1 = [X_0, X_1, \dots, X_{N/2-1}, \underbrace{0, \dots, 0}_{(L-1)N/2}], \quad (11)$$

$$X_2 = [\underbrace{0, \dots, 0}_{(L-1)N/2}, X_{N/2}, X_{N/2+1}, \dots, X_N]. \quad (12)$$

2) 对第一个子序列  $X_1$  使用转换向量  $G$  进行循环卷积运算,  $G$  是  $1 \times (LN/2)$  维的向量, 由 2 个  $1 \times (LN/2)$  维的基向量  $G_1^0$  与  $G_2^0$  通过式  $G = G_1^0 + aG_2^0$  得到, 并且  $a \in \{\pm 1, \pm j\}$ ,  $G_2^0$  由  $G_1^0$  循环右移  $v$  位得到, 其中  $v = 0, 1, 2, \dots, \frac{LN}{4} - 1$ .

$$G_1^0 = [\underbrace{-1, 0, 0, \dots, 0}_{\frac{LN}{4}-1}, \underbrace{1, 0, 0, \dots, 0}_{\frac{LN}{4}-1}], \quad (13)$$

$$G_2^0 = [\underbrace{1, 0, 0, \dots, 0}_{\frac{LN}{4}-1}, \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{\frac{LN}{4}-1}]. \quad (14)$$

$Q_{11} = x_1 \otimes G_1^0, Q_{12} = x_1 \otimes G_2^0$ , 而且  $Q_{12}^v$  是  $Q_{12}^0$  右移  $v$  位得到, 则子块 1 的输出  $y_1^v = Q_{11} + Q_{12}^v$ .

3) 对子块序列  $X_2$  使用随机筛选函数  $H_n$  进

行筛选,得到随机性较好的筛选序列  $y_2$ .

4) 将两子块的输出按照  $y^p = y_1^v + \omega y_2$  进行相加,其中,  $\omega$  为相位值,  $\omega$  为  $-1$  和  $1$  分别是第二个子块的备选信号的  $0^\circ$  和  $180^\circ$  相移,从而得到时域的 OFDM 备选信号  $y^p$ .

5) 从所有输出信号中筛选 PAPR 最小的信号进行传输,通过式 (15) 获得最终传输信号  $\tilde{x}$ :

$$\tilde{x} = \arg \min \text{PAPR}(y^i) . \quad (15)$$

## 4 计算复杂度

在 OFDM 系统中,子载波数为  $N$  的 OFDM 信号需要进行 IFFT 运算<sup>[12]</sup>,每进行一次 IFFT 运算需要  $\frac{N}{2}\text{lb}N$  次复数乘法和  $N\text{lb}N$  次复数加法. 在 SLM 算法中,当相位数为  $M$  时,若要选出具有最小峰均功率比的信号需要进行  $M$  次 IFFT 运算,因此需要进行  $M\frac{LN}{2}\text{lb}LN$  次乘法和  $MLN\text{lb}LN$  次复数加法,其复杂度较高. 对于 CR-SLM 算法每一个循环卷积需要  $3LN/2$  次复数加法和  $0$  次复数乘法<sup>[13]</sup>,且两子块输出相加的复杂度为  $vLN/2$ . 在子块序列 2 中筛选函数的计算时需要  $LN$  次复数加法和  $LN$  次复数乘法,最后产生  $y^p$  个备选信号需要  $pLN/2$  次加法,而且只进行了 2 次长度为  $\frac{LN}{2}$  的 IFFT 变换,需要  $\frac{LN}{2}\text{lb}\frac{LN}{2}$  次复数乘法和  $LN\text{lb}\frac{LN}{2}$  次复数加法. 因此 CR-SLM 算法总的复杂度为

$$N_{\text{mul}} = \frac{LN}{2}\text{lb}\frac{LN}{2} + \frac{vLN}{2} + LN , \quad (16)$$

$$N_{\text{add}} = LN\text{lb}\frac{LN}{2} + \frac{3LN}{2} + \frac{vLN}{2} + \frac{pLN}{2} + LN . \quad (17)$$

因此,CR-SLM 算法相对于传统的 SLM 方法的计算复杂度降低比 (computational complexity reduction ratio, CCRR)<sup>[13]</sup>表示为

$$\text{CCRR} = (1 - \frac{\text{改进方法的计算复杂度}}{\text{SLM 方法的计算复杂度}}) \times 100\% . \quad (18)$$

将本文提出的算法、传统的 SLM 算法及文献 [7] 中的分块算法同时进行比较,当  $N = 256$ , 备选信号数目为 64 时,3 种算法的计算复杂度与 CCRR 如表 1 所示.

表 1 传统 SLM 算法,文献[7],CR-SLM 算法的 CCRR 的比较

Table 1 CCRR comparison for SLM, literature [7] and CR-SLM algorithm

算法	SLM	文献[7]	CR-SLM	CCRR/%
$N_{\text{mul}}$	81 920	18 880	9 427	88. 49
$N_{\text{add}}$	147 456	42 112	11 392	92. 27
IFFT 块数	64	33	2	—

## 5 仿真结果

使用 MATLAB 软件进行 PAPR 性能的仿真分析,仿真条件:调制方式为 QPSK 调制,采用 1 000 个独立的 OFDM 符号, PAPR 的性能采用 CCDF 来描述,本文对  $N = 256$  和  $N = 128$  时的情况进行了仿真. 图 3 为 3 种算法的 PAPR 降低性能对比图.

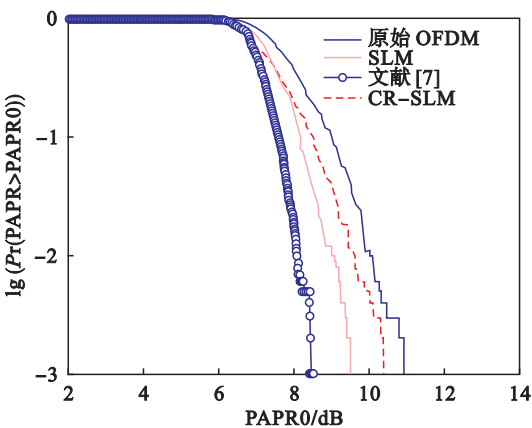


图 3  $N = 256$  时 SLM,文献[7]及 CR-SLM 算法的 CCDF 对比图

Fig. 3 CCDF plot comparison of SLM, literature [7] and CR-SLM when  $N = 256$

当 OFDM 系统子载波数  $N = 128$ ,传统 SLM 算法中的相位序列  $M = 2$  时,3 种算法的 PAPR 性能对比图如图 4 所示.

从图 3、图 4 中可以看出,本文提出的 CR-SLM 算法比传统的 SLM 算法降低 PAPR 的性能稍差,但是这种差值是控制在 1 dB 之内的. CR-SLM 算法相较于文献[7],PAPR 的性能与其相差 2 dB 之内,同时其计算复杂度在文献[7]的基础上又降低 50% 以上. CR-SLM 算法主要优势是降低系统的复杂度,在降低 88% 左右的计算复杂度的情况下,维持 1 dB 左右的 PAPR 性能的降低也在可接受的范围内.



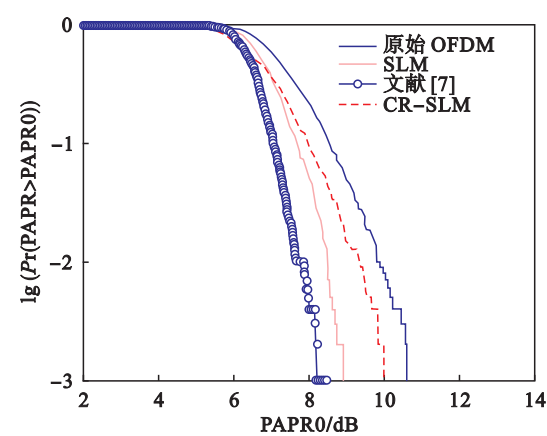


图 4  $N=128$  时 SLM,文献[7]及 CR-SLM 算法的 CCDF 对比图

Fig. 4 CCDF plot comparison of SLM, literature[7] and CR-SLM when  $N=128$

## 6 结 语

本文主要针对 OFDM 系统中存在较高的 PAPR 值进行研究,虽然传统 SLM 算法能够有效地降低系统的 PAPR,但是该算法有着较高的计算复杂度,降低了系统的整体性能. 针对传统 SLM 算法计算复杂度较高的问题,本文提出了 CR-SLM 算法,此算法在传统 SLM 算法的基础上,使用转换向量与随机筛选函数结合的方法减少 IFFT 模块的使用次数,从而可以在保持与传统 SLM 算法 PAPR 值接近的情况下,较大幅度地降低了计算复杂度. 后续研究工作,能够在降低计算复杂度的同时降低系统的 PAPR 性能,达到较好的系统传输性能.

### 参考文献:

[ 1 ] 王直,马蹕. 一种低复杂度的均峰功率抑制技术—PSM [ J ]. 电子设计工程,2015,23(17):95-100.  
(Wang Zhi, Ma Jian. A low complexity average-peak power ratio suppression technique - PSM [ J ]. *Electronic Design Engineering*, 2015, 23(17): 95-100. )

[ 2 ] Sghaier M, Abdelkefi F, Siala M. Efficient embedded signaling through DCT precoding matrix for SLM method in OFDM system [ C ]//International Conference on Communications and Networking. Toronto, 2015: 1-5.

[ 3 ] Yu H, Wei G. Choosing the optimal clipping ratio for clipping and filtering PAR-reduction scheme in OFDM [ J ]. *Networking and Mobile Computing*, 2007, 5(7): 460-463.

[ 4 ] Jiang T, 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.

[ 5 ] Wu Y, Man K L, Wang Y. Optimum selective mapping for PAPR reduction [ J ]. *Wireless Telecommunications Symposium ( WTS )*, 2011, 28: 1-5.

[ 6 ] Singh K, Bharti M R, Jamwal S. A modified PAPR reduction scheme based on SLM and PTS techniques signal processing [ C ]//IEEE International Computing and Control ( ISPPC ). Wanknaghat Solan, 2012: 1-6.

[ 7 ] Sudha V, Anilkumar B, Sriramkumar D. Low-complexity modified SLM method for PAPR reduction in OFDM systems [ C ]//International Conference Electronics and Communication Systems ( ICECS ). Coimbatore, 2015: 1324-1328.

[ 8 ] 刘晓明,姜荣庆. OFDM 系统中抑制 PAPR 的低复杂度 SLM 技术 [ J ]. 世界研究科技与发展, 2010, 23(6): 746-748.  
(Liu Xiao-ming, Jiang Rong-qing. Low complexity SLM technology for suppressing PAPR in OFDM system [ J ]. *World Sci-Tech RMYMD*, 2010, 23(6): 746-748. )

[ 9 ] Katam S, Muthuchidambaranathan P. Low complexity SLM-PTS method for reduction of PAPR in OFDM systems [ C ]//International Conference Eco-friendly Computing and Communication Systems ( ICECCS ). Mangalore, 2014: 233-237.

[ 10 ] Kojima T, Iwamoto S, Shida Y, et al. A novel SLM PAPR reduction of OFDM signals without side information [ C ]//IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology. Luxor, 2010: 321-325.

[ 11 ] 徐林搏. 一种降低 OFDM 系统 PAPR 的低复杂度算法 [ J ]. 电子科技, 2014, 27(4): 27-29.  
(Xu Lin-bo. A low complexity algorithm to reduce the PAPR of OFDM systems [ J ]. *Electronic Science and Technology*, 2014, 27(4): 27-29. )

[ 12 ] 孙奇,黄明. OFDM 系统中降低 PAPR 方法研究 [ J ]. 电子科学技术, 2016, 3(5): 611-614.  
(Sun Qi, Huang Ming. Reduction of PAPR in OFDM systems [ J ]. *Electronic Science & Technology*, 2016, 3(5): 611-614. )

[ 13 ] Katam S, Muthuchidambaranathan P. Modified SLM method for reduction of PAPR in OFDM systems using decimal sequences [ C ]//Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems ( SPICES ). Kozhikode, 2015: 1-5.