

改进 PTS 技术和改进阈值限幅法  
结合的 PAPR 降低方法

黄 娴, 谭 鸽 伟

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 针对阈值限幅法误码率极大和部分传输序列(PTS)技术复杂度高的问题,提出一种改进的基于阈值限幅和 PTS 技术的正交小波包复用(OWPM)系统高峰均功率比(PAPR)降低方法. 仿真结果表明:改进后的算法性能得到提升,且经阈值限幅法和 PTS 技术联合处理后,能够在尽量不影响原系统误码率性能的前提下,更好地降低系统 PAPR 值,同时也降低了系统计算复杂度.

**关键词:** 多载波调制; 正交小波包复用; 峰值平均功率比; 阈值限幅; 部分传输序列

**中图分类号:** TN 911.72                      **文献标志码:** A

正交小波包复用(OWPM)系统由于存在某个时刻多个子载波以同相累加产生的高峰均功率比问题,从而要求发射端功率放大器具有非常大的线性区域. 若这一要求无法满足,就会产生信号的畸变及子载波间的互调干扰和带外辐射,最终降低系统的性能<sup>[1]</sup>. 因此,有必要寻求一种本质上解决信号高峰均功率比(PAPR)问题的方法<sup>[2]</sup>. 目前,针对 OWPM 系统 PAPR 抑制问题,一种思路是从优化小波包调制部分改善系统性能方面入手<sup>[3-6]</sup>,而另一种思路则是将其他多载波调制系统特别是正交频分复用(OFDM)系统已采用的算法应用到 OWPM 系统中<sup>[7]</sup>. 文献[8-9]所探讨的概率类方法便是应用该种原理进行处理,通常不会影响系统的误码率性能,但实现复杂度高. 文献[10-13]研究的预畸变方法则是直接对经过调制后的时域信号作非线性变换,从而降低信号的峰均功率比,但由于该种变换法引入的是非线性操作,所以容易引起信号的畸变. OWPM 系统的各种 PAPR 降低方法均有其优缺点,如果仅用一种算法并不能达到想要的降低效果,而为了达到某种理想效果,可能会导致另一方面性能大大降低<sup>[14]</sup>. 传统 PTS 技术采用遍历搜索法进行相位因子寻优,计算复杂度高,实际应用困难;另一方面,传统阈值限幅法又会引起系统误码率性能的降低. 因此,针对传统算法的高计算复杂度和低误码率性能问题,本文提出一种基于改进 PTS 技术和改进阈值限幅法的 PAPR 降低方法.

1 基本原理

基于阈值限幅和 PTS 技术的联合算法,其发送端原理框图如图 1 所示. 需要注意的是,由于 PTS 技术是一种线性操作,而阈值限幅法是一种非线性处理过程,如果采取先对系统进行阈值限幅法操作,而后再进行 PTS 处理,那么 PTS 算法中的重组过程将使得阈值限幅算法原先的降

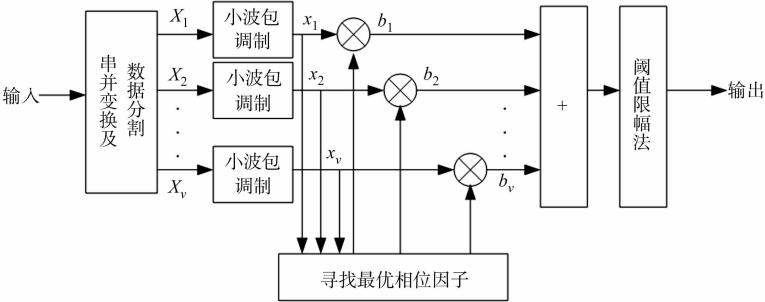


图 1 联合算法的发送端原理框图  
Fig. 1 Transmitter's functional block diagram of joint algorithm

低效果被破坏;同时由于非线性的优先处理有可能使得后续的线性操作加大信号的畸变程度,所以联合算法的执行中只能采取先对信号进行 PTS 技术处理,再对处理后的信号进行阈值限幅法操作。

## 2 改进 PTS 技术

首先,长度为  $N$  的源数据向量  $\mathbf{X}$  通过串并变换和数据分割,得到  $V$  个互不重叠的子向量. 为保证每个子向量的长度均为  $N$ ,需要在每个子向量的剩余子载波位置上填零,最终得到长度都为  $N$  的  $V$  个子向量  $\mathbf{X}_l = \{X_l^0, X_l^1, \dots, X_l^N\}$ . 因此,有

$$\mathbf{X} = \sum_{l=1}^V \mathbf{X}_l.$$

其中: $V$  表示数据分组数.

然后,分别对各个子向量进行逆离散小波包变换(IDWPT),得到  $V$  个时域信号,即

$$x_l = \text{IDWPT}\{\mathbf{X}_l\}, \quad l = 1, 2, \dots, V.$$

最后,将这  $V$  个时域信号与加权系数  $b_l$  进行加权和优化处理,得到需要传送的信号为

$$x = \sum_{l=1}^V b_l \cdot x_l. \quad (1)$$

式(1)中: $b_l = (b_l^0, b_l^1, \dots, b_l^{N-1})$ ,  $l = 1, 2, \dots, V$ , 也称作子向量的旋转因子,它们统计独立,并且满足  $b_l^i = \exp(j\phi_l^i)$ ,  $\phi_l^i \in [0, 2\pi]$ . 由于  $b_l$  可随机选择,所以可通过选择一组最优的加权系数,即需满足

$$\{b_1, b_2, \dots, b_V\} = \arg \min_{\{b_1, b_2, \dots, b_V\}} \left( \max_{1 \leq n \leq N} \left| \sum_{l=1}^V b_l \cdot x_l \right|^2 \right),$$

使其 PAPR 值最小进行传送. 其中: $\arg \min(\cdot)$  表示函数取最小值时所用的判决条件.

PTS 技术是一种线性处理方法,不会对信号产生畸变且能有效地降低 PAPR,但有个致命的缺点,就是计算复杂度高. 因此,研究具有低计算复杂度的 PTS 技术是十分有必要的. 下面主要从探讨搜索最优相位因子角度来降低系统的计算复杂度.

遍历搜索法是一种最优搜索方法,但计算复杂度高,实际应用困难. Cimini 等提出了一种次优算法 Cimini 搜索法,该算法很好地解决了遍历搜索法高计算复杂度的缺点,但它也导致了 PAPR 抑制性能的降低. 为解决 Cimini 搜索法 PAPR 抑制性能差的问题,文献[15]提出一种阈值搜索法. 该算法采用循环式的搜索方式,在阈值取得较小的时候,可以避免相位因子的搜索陷入局部最优点,从而增加搜索到最佳相位因子序列的概率,最终大大地提升信号 PAPR 抑制性能,但它也带来了系统复杂度的提高.

针对文献[15]的不足之处,文中提出一种改进的阈值搜索法,改进的阈值搜索法具体流程如图 2 所示. 即在保证高 PAPR 抑制性能的前提下,通过增加“可接受概率”模块来减少系统循环操作,达到快速收敛最优值的效果,最终达到降低系统复杂度的目的. 假设当前相位因子序列计算所得峰均比为 PAPR,而 threshold 表示系统预先设定的阈值,则可接受概率为

$$P = \begin{cases} 1, & \lambda \leq 0, \\ \exp(-\frac{\lambda}{T}), & \lambda > 0. \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $\lambda = \text{PAPR} - \text{threshold}$ , 而  $T$  为一变量,随着循环迭代次数的增加而降低. 这里采用模拟退火中的几何冷却对  $T$  进行处理<sup>[15]</sup>, 即  $T_{i+1} = nT_i$ , 其中: $i$  为循环迭代次数; $n = (T_f/T_s)^{1/I}$  为  $T$  的下降速率, $I$  为总循环迭代数,  $T_s, T_f$  分别为  $T$  的初始值和最终值.

算法原理:若  $\lambda \leq 0$ , 即  $\text{PAPR} \leq \text{threshold}$ , 则  $P = 1$ , 即百分之百接受当前相位因子序列, 停止搜索; 若  $\lambda > 0$ , 即  $\text{PAPR} > \text{threshold}$ , 则计算可接受概率值  $P = \exp(-\frac{\lambda}{T})$ , 同时随机产生一个在  $(0, 1)$  之间均匀分布的数  $r$ . 从式(2)可以看出: PAPR 的值与 threshold 的值差距越大, 即  $\lambda$  的值越大,  $P$  的值就越小. 所以, 只要  $\lambda$  的值在一个可接受的范围内, 即只要  $P$  的值大于 0.5, 那么  $r < P$  的概率就要大于  $r > P$  的概率, 此时可接受当前相位因子序列, 停止搜索; 否则, 继续搜索.

算法有如下 2 个主要步骤.

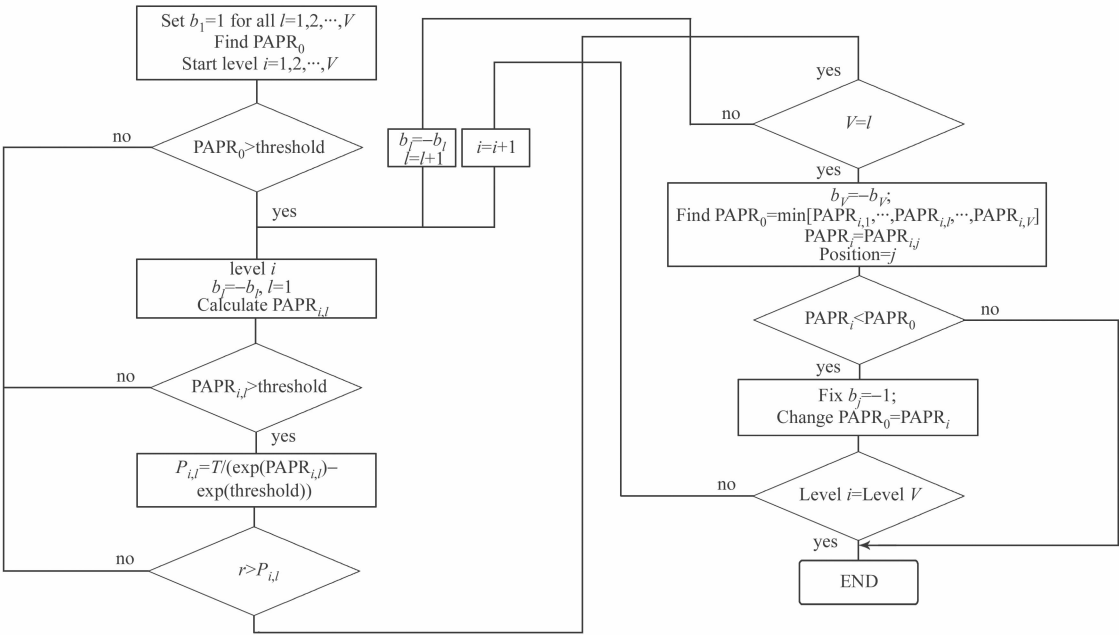


图 2 基于改进的阈值搜索法的联合算法

Fig. 2 Joint algorithm based on improved threshold searching method

**步骤 1** 令所有的相位因子  $b_l=1\{l=1,2,\cdots,V\}$ , 计算此时的峰均比  $\text{PAPR}_0$ .

**步骤 2** 假设阈值  $\text{threshold}=4\text{ dB}$ . 若  $\text{PAPR}_0\leq\text{threshold}$ , 则搜索结束; 否则进行循环搜索.

循环搜索过程如下: 令  $i=1, l=1$ , 其中  $i$  为循环次数; 翻转  $b_l=-b_l$ , 并重新计算峰均比  $\text{PAPR}_{i,l}$ . 若  $\text{PAPR}_{i,l}\leq\text{threshold}$ , 则搜索结束; 否则随机产生一个在  $(0,1)$  之间均匀分布的数  $r$ , 并计算当前可接受概率  $P=\exp(-\frac{\lambda}{T})$ , 如果  $r<P$ , 那么搜索结束, 否则恢复  $b_l=-b_l$ , 同时翻转  $b_{l+1}=-b_{l+1}$ , 计算此时的峰均比  $\text{PAPR}_{i,l+1}, \cdots$ , 直到优化完所有的相位因子  $b_l, l=2,3,\cdots,V$ .

余下步骤与原阈值搜索法相同, 最终可得到优化的相位因子序列为  $\{b_1, b_2, \cdots, b_V\} = \min(\text{PAPR}_1, \text{PAPR}_2, \cdots, \text{PAPR}_V)$ .

相比原阈值搜索法, 改进的阈值搜索法添加了一个“可接受概率”模块, 通过比较随机数  $r$  与可接受概率  $P$  之间的大小来判断是否接受当前相位因子序列, 防止原阈值搜索法在阈值选取过低的时候产生的循环操作, 达到快速收敛最优值的效果. 这是一种在计算复杂度与抑制 PAPR 性能两者之间寻求平衡的有效方法.

3 改进阈值限幅法

传统阈值限幅法的原理相当于对原始信号加一矩形窗, 如果信号幅值小于矩形窗函数的幅值, 那么保持信号不变; 否则, 信号幅值等于矩形窗函数的幅值. 发送端函数表达式为

$$y = \begin{cases} x, & |x| \leq T, \\ T, & |x| > T. \end{cases} \tag{3}$$

式(3)中:  $T$  代表预先给定的阈值.

该方法可大大降低系统的 PAPR 值, 但由于信号经过无线信道后, 引入的多种噪声或干扰使得接收端几乎难以解调出原始信号, 所以误码率极高. 研究者多年来都亲睐于此种方法的主要是因为其算法简单, 易实现. 然后, 虽可通过提升系统其他部分的误码率性能来补偿该方法引起的大误码率性能降低, 但总体性能还是受到了一定的影响.

针对传统阈值限幅法接收端解调难的问题, 提出一种改进的阈值限幅法. 该算法将发送端函数表达式定义为

$$y = \begin{cases} x, & |x| \leq T, \\ \frac{x}{k}, & |x| > T. \end{cases} \tag{4}$$

为避免信号严重畸变, 可将  $T$  取值为信号的平均功率,  $k$  取值为信号的平均幅值. 其中, 对于  $k$  的取值不宜过大, 否则系统误码率升高. 考虑到研究的大多传输信号为复数, 仅靠单纯的加减运算难以确保信号幅值降低, 所以把乘除运算应用于算法中, 达到算法目的. 所以, 只要两种方法选取得当, 就可以保证在降低系统 PAPR 的情况下既降低了系统计算复杂度, 又不会产生过大的噪声干扰和带外辐射.

4 实验仿真结果

实验采用 Matlab 软件进行仿真分析. 仿真环境: 源信号序列随机产生, 总符号数为 10 000, 采用 4QAM 进行星座映射, 子载波数为 8, 同时选取 db4 小波作为小波包基. 由于信号峰均比的 CCDF 是在发送端进行计算的, 不涉及信道部分, 所以算法的 PAPR 抑制性能不受信道的影响. 但为了验证算法的 BER 性能, 在模拟信道中加入了高斯白噪声进行仿真比较.

针对传统算法的高计算复杂度和低误码率 (BER) 性能问题, 从算法的 PAPR 抑制性能、系统复杂度和误码率 3 个方面进行定量分析比较, 结果分别如图 3, 4 和表 1 所示. 其中:  $R_{\text{BE}}$  为误码率;  $R_{\text{SN}}$  为信噪比; 未处理表示该系统未添加任何 PAPR 抑制算法; 文中算法即基于改进 PTS 技术和改进阈值限幅法的 PAPR 降低方法; 系统复杂度度量只考虑 PAPR 的计算次数.

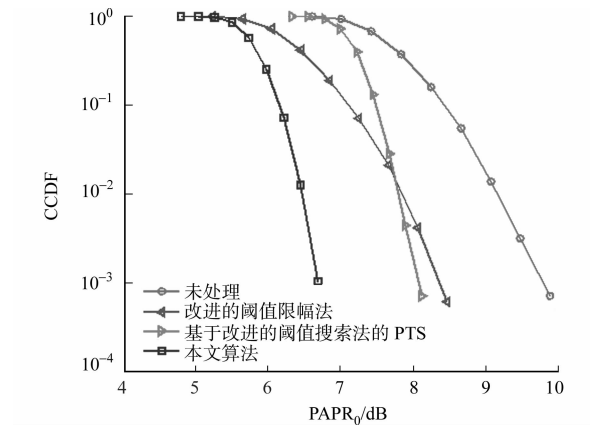


图 3 算法的 PAPR 抑制性能比较  
Fig. 3 PAPR reduction performance comparison of algorithms

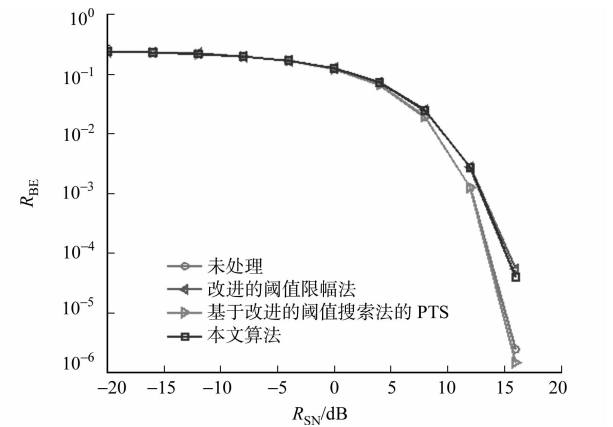


图 4 算法的 BER 性能比较  
Fig. 4 BER performance comparison of algorithms

表 1 各种搜索法的循环迭代数

Tab. 1 Number of loop iterations of various searching methods

项目	分割子模块数	遍历搜索法	Cimini 搜索法	阈值搜索法 (阈值=4 dB)	改进阈值搜索法 (阈值=4 dB)
最小迭代数	4	24	59	5	2
	8	28		9	2
最大迭代数	4	24	5	10	10
	8	28	9	36	34

从图 3 可知: 经联合处理后的系统具有比单独使用改进阈值限幅法或者 PTS 基于改进阈值搜索法更好的 PAPR 抑制性能效果.

从图 4 可知: 在  $R_{\text{SN}} < 5$  dB 的情况下, 各种 PAPR 降低算法的 BER 性能曲线几乎重合; 而当  $R_{\text{SN}} > 5$  dB 时, 提出的 PAPR 降低方法, 其 BER 性能虽略低于 PTS 基于改进阈值搜索法但却与改进阈值限幅法相当.

从表 1 可知: Cimini 搜索法、阈值搜索法和改进阈值搜索法的复杂度都比遍历搜索法有了大幅度的降低. 其中, 对于某些系统, 所提出的改进阈值搜索法仅需 2 次的迭代数, 即可使其具有比原阈值搜索法

更低的复杂度而却不影响其 PAPR 抑制性能.

综上所述,相比单独使用 PTS 基于改进阈值搜索法或改进阈值限幅法,提出的一种基于改进阈值限幅法和改进 PTS 技术的 PAPR 降低方法,能够在尽量不影响原系统 BER 性能的前提下,更加有效地提升发送端 PAPR 抑制性能,是一种在 PAPR 抑制性能和 BER 性能两者之间寻求平衡点的有效方法.

由于所提出的算法是两种算法的联合处理过程,所以影响因素较多.在这里,只针对改进阈值限幅法中所涉及到的参数  $k$  进行定量分析比较,结果分别如图 5,6 所示.

从图 5 可知:参数  $k$  越大,对信号的 PAPR 抑制性能越好;然而参数  $k$  越大,系统的 BER 性能越差,说明这是以牺牲一定的 BER 性能来换取 PAPR 抑制效果的提升.对于参数  $k$  的具体选取方法还未有效的解决办法,须待后续的研究.实验仿真过程中,经过多次尝试与仿真,最终以信号的平均幅值作为文中算法的参数  $k$  值.

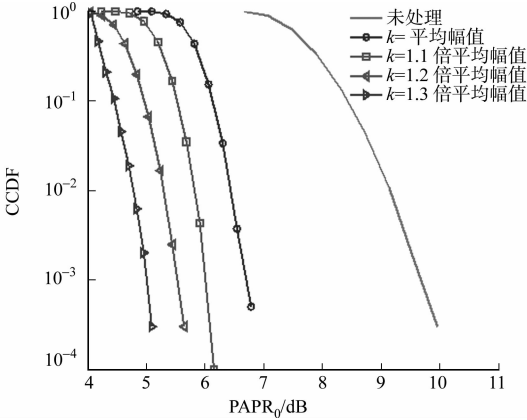


图 5 不同参数  $k$  的 PAPR 抑制性能比较  
Fig. 5 PAPR reduction performance comparison of different parameters  $k$

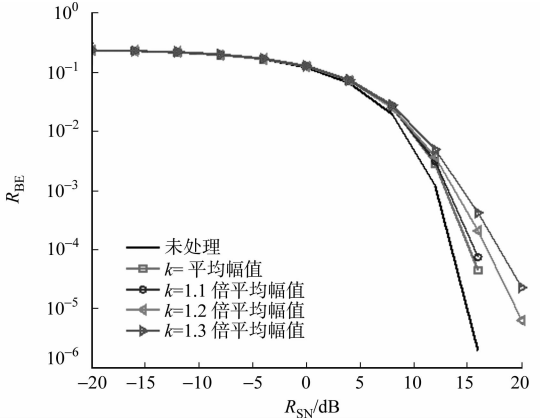


图 6 不同参数  $k$  的 BER 性能比较  
Fig. 6 BER performance comparison of different parameters  $k$

为了观察算法在不同噪声类型下的 BER 性能,分别引入均匀分布白噪声和指数分布白噪声加以分析比较,结果如图 7 所示.图 7 中:指数分布白噪声的参数 MU 取值为 1;而选取均匀分布白噪声的均值为 0,方差则由系统所给信噪比算出.从图 7 可知:加入噪声后,系统的 BER 性能都有所下降,指数分布白噪声对系统的影响最大,而高斯白噪声与均匀分布白噪声的 BER 性能相当.

5 结束语

研究阈值限幅法和 PTS 技术的改进算法,同时对改进后的两种算法进行级联合处理,提出一种改进的基于阈值限幅和 PTS 技术的 OWPM 系统的 PAPR 降低方法.理论和仿真结果显示:改进后的阈值限幅法或者 PTS 技术相比改进前的算法都有了相对应的性能提升;而经阈值限幅法和 PTS 技术的联合处理,能够在尽量不影响原系统误码率性能的前提下,更好的降低系统 PAPR 值,同时降低系统计算复杂度.

参考文献:

[1] AZURDIA-MEZA C A, LEE K, LEE K. PAPR reduction in SC-FDMA by pulse shaping using parametric linear combination pulses[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(12): 2008-2011.  
[2] 郝久玉, 耿化卿, 何要庄, 等. 小波包多载波调制峰均功率比问题研究[J]. 天津大学学报, 2006, 39(5): 605-608.

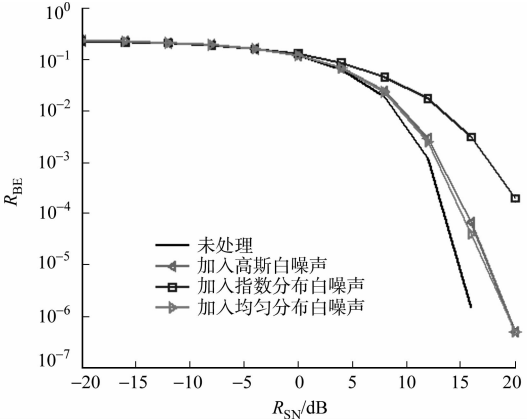


图 7 不同噪声下的 BER 性能比较  
Fig. 7 BER performance comparison under different noises

[3] LIU Miao,WANG Ke,HE Yan,et al. Optimizing PAPR by linear programming in wavelet packet modulation[C]// 2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control (ICACC). Shenyang:IEEE Press,2010:227-231.

[4] KUMBASAR V,KUCUR O. Better wavelet packet tree structures for PAPR reduction in WOFDM systems[J]. Digital Signal Processing,2008,18(6):885-891.

[5] LE N T,MURUGANATHAN S D,SESAY A B. An efficient PAPR reduction method for wavelet packet modulation schemes[C]// Vehicular Technology Conference. Barcelona:IEEE Press,2009:1-5.

[6] ZAKARIA J,SALLEH M F M. Wavelet-based OFDM analysis: BER performance and PAPR profile for various wavelets[C]// IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications. Bandung:IEEE Press,2012:29-33.

[7] 王丽,湛明,卢满宏. 采用正弦压扩变换降低 OFDM 峰均比的方法研究[J]. 遥测遥控,2010,31(4):22-24.

[8] LIXIA M,MURRONI M. Peak-to-average power ratio reduction in multi-carrier system using genetic algorithms [J]. IET Signal Processing,2011,5(3):356-363.

[9] TORUN B, LAKSHMANAN M K, NIKOOKAR H. Peak-to-average power ratio reduction of wavelet packet modulation by adaptive phase selection[C]// IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. Istanbul:IEEE Press,2010:105-110.

[10] ROSTAMZADEH M,VAKILY V T,MOSHFEGH M. PAPR reduction in WPDM and OFDM systems using an adaptive threshold companding scheme[C]// IEEE 5th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. Amman:IEEE Press,2008:1-6.

[11] ABDULLAH H N,SAHIB F,VALENZUELA A. Hybrid PAPR reduction technique for complex wavelet packet modulation system[C]// Wireless Days. Dublin:IEEE Press,2012:1-3.

[12] JIANG Tao,LI Cai,NI Chun-xing. Effect of PAPR reduction on spectrum and energy efficiencies in OFDM systems with class-A HPA over AWGN channel[J]. IEEE Transactions on Broadcasting,2013,59(3):1-7.

[13] WANG Y,WANG L H,GE J H,et al. Nonlinear companding transform technique for reducing PAPR of OFDM signals[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics,2012,58(3):752-757.

[14] 黄淑梅,朱瑾瑜,刘海燕. 使用联合算法来降低 OFDM 系统的峰均比[J]. 计算机应用,2007,27(8):1874-1876.

[15] KWON O J,HA Y H. Multi-carrier PAP reduction method using sub-optimal PTS with threshold[J]. IEEE Transactions on Broadcasting,2003,49(2):232-236.

# PAPR Reduction Method Based on Improved PTS Technology and Improved Threshold Clipping Method

HUANG Xian, TAN Ge-wei

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of large BER for the threshold clipping method and the high computational complexity for partial transmit sequence (PTS) technology, an improved peak to average power ratio (PAPR) reduction method based on the threshold clipping and PTS technology for orthogonal wavelet packet multiplexing (OWPM) system is put forward in the paper. Simulation results show that the improved algorithm compared with the original algorithm has the corresponding performance improvement, and by the combined treatment with threshold clipping method and PTS technology, in the premise of not affecting the original system BER performance, better reduce the system PAPR value, while reducing system computational complexity.

**Keywords:** multicarrier modulation; orthogonal wavelet packet multiplexing; peak to average power ratio; threshold clipping; partial transmit sequence

(责任编辑: 黄晓楠      英文审校: 吴逢铁)