

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.03.011

降低 OFDM 系统峰均功率的次优 PTS-Clipping 联合算法

黎彪, 文鸿, 陈青辉, 许启芳

(湖南工业大学 计算机学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对正交频分复用 (OFDM) 系统的高峰均功率比 (PAPR) 问题, 提出一种联合次优部分传输序列 (PTS) 与限幅的改进算法。该算法使用次优 PTS 降低 OFDM 信号的相关性, 并联合限幅处理进一步降低 OFDM 信号的峰均功率。仿真结果表明, 相比传统 PTS 算法, 次优 PTS-Clipping 联合算法的复杂度降低了近一半, PAPR 性能降低了 1 dB, 表明其能够最大限度地利用现有算法的优势, 在降低 PAPR 的同时, 又不会引入很大的计算量和边带噪声。

关键词: 正交频分复用; 峰均值功率比; 次优 PTS; 限幅

中图分类号: TN929.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2019)03-0070-05

引文格式: 黎彪, 文鸿, 陈青辉, 等. 降低 OFDM 系统峰均功率的次优 PTS-Clipping 联合算法 [J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(3): 70-74.

PAPR Reduction Algorithm Enabled by Threshold-Based Suboptimal PTS Combined with Peak Clipping for OFDM Systems

LI Biao, WEN Hong, CHEN Qinghui, XU Qifang

(College of Computer Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of flaws related to the peak-to-average power ratio (PAPR) in orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems, a proposal has thus been made of an improved algorithm for joint sub-optimal partial transmission sequence (PTS) and amplitude limiting. By using sub-optimal PTS to reduce the correlation of OFDM signals, a reduction of the peak-to-average power of OFDM signals can be achieved by combining amplitude-limiting processing. The simulation results show that, compared with the traditional PTS algorithm, the complexity of the sub-optimal PTS-Clipping algorithm has been reduced by half to the effect, with PAPR performance reduced by 1 dB as well, indicating that it helps to maximize the advantages of existing algorithms and reduce PAPR, without getting too much calculation and sideband noise involved.

Keywords: orthogonal frequency division multiplexing(OFDM); peak-to-average power ratio(PAPR); suboptimal PTS; amplitude limiting

收稿日期: 2019-01-10

基金项目: 湖南省教育厅创新平台开放基金资助项目 (15K035)

作者简介: 黎彪 (1992-), 男, 湖南邵阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为下一代无线通信网络,
E-mail: 893998547@qq.com

通信作者: 文鸿 (1981-), 男, 湖南邵阳人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事下一代宽带无线通信网络方面的教学与研究, E-mail: wenhhut@163.com

1 研究背景

正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 技术已被广泛地应用于新一代移动通信网络中^[1], 其优势主要为频谱利用率高和抗多径衰落能力强^[2-3]。但由于 OFDM 信号是由子载波叠加产生, 若子载波同相或相位近似就会引起高峰值的瞬时信号, 使得瞬时信号的峰均值功率比 (peak to average power ratio, PAPR, 简称峰均比) 过大。高 PAPR 对功放器件的线性放大范围提出了挑战, 容易发生信号畸变, 进而破坏信号的正交性^[4-5]。

目前针对 OFDM 信号峰均比过高问题的主要解决方法有畸变类、编码类及概率类^[6]。畸变类算法是所有算法中复杂度最低的, 其优势为不受发送系统子载波数量的影响, 复杂度较低, 且无需在发送信号中添加辅助信息, 不会影响系统信号发送速率。但该算法在处理信号过程中会使信号非线性失真, 导致带内失真及带外扩展, 进而使系统误码率升高及频谱利用率降低, 其代表算法为压扩算法与限幅算法。编码类算法是对信号进行一种特殊编码。由于 OFDM 信号高峰均比产生的原因是多个同相子载波叠加, 因此编码类算法的实质即为降低同相信号在某一点同时出现的概率, 常采用多种信号编码方式生成不同码字, 并选取其中峰均比较低的一组码字进行传输。其优点是信号在处理过程中属于线性变换, 不会出现信号畸变, 相比畸变类算法, 该编码类算法不会引入额外的噪声干扰。但当 OFDM 信号传输的子信道数目较大时, 其编译码复杂度大, 所以该方法更适用于信道数目较少的情况。概率类算法的原理是降低高 PAPR 出现概率, 而非针对 OFDM 信号峰值。常用处理方法是对信号进行相位调整, 从而减少同相信号叠加概率。常用的概率类技术包括部分传输序列法 (partial transmit sequence, PTS)、子载波注入法 (tone injection, TI)、动态星座图扩展法 (active constellation extension, ACT) 和选择映射法 (selective mapping, SLM)^[6]。概率类算法的优点与编码类算法一样, 在信号处理过程中不会出现畸变, 其劣势为算法性能的少许提升需增加巨大的算法复杂度, 即算法的性能与复杂度间的关系不成正比。

根据 PTS 算法的特性可知其属于概率类方法, 该算法在对信号进行处理时不会导致信号失真, 即不会引入额外的边带噪声。但由于传统 PTS 算法的复杂度过高, 其可选相位因子的最优解会随着子序列数目的增加而出现指数级别增长^[7-9], 导致其实用性不高。而对于限幅算法, 其优点有计算量低、执行效率高, 但限幅后的信号相比原始信号会出现畸变, 从而引入大量边带噪声, 尤其是当限幅门限较低时,

其劣势表现得更明显, 进而导致接收端的误码率升高。所以当系统对峰均比降低量需求较高时, 限幅算法不再适用。所以本研究基于 PTS 算法与限幅算法的优缺点, 提出一种次优 PTS-Clipping 联合算法, 在满足降低 OFDM 峰均比的同时, 改进 PTS 算法复杂度过高与限幅算法边带噪声引入过大等问题。

1 OFDM 信号峰均比

OFDM 信号是由调制后多个子载波叠加而成的, 其原理是将系统宽带信号转化为多个相互正交的子信道, 使得原始信号在传输过程中受到的频率选择性衰落变为窄带子信道上的平坦衰落。假设频域信号表示为 $\mathbf{X}=[X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]^T$, 其中 N 为子载波数量, 则 OFDM 的时域调制信号可表示为

$$\mathbf{x}_n = \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{X}_k e^{j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (1)$$

式中 \mathbf{X}_k 为某一个具体 OFDM 频域信号, k 为序号。

OFDM 时域离散信号为 $\mathbf{x}=[x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}]^T$, 观察式 (1) 可知, 其对应离散傅里叶逆变换 (inverse discrete Fourier transformation, IDFT) 形式, 所以 OFDM 信号常在发送端采用离散快速傅里叶逆变换 (inverse fast Fourier transform, IFFT) 模块进行调制。

根据 OFDM 系统的特性可知, OFDM 发送信号利用多个不同相位与幅度的子载波叠加而成, 当子载波数目增大时, 信号中某一处出现同相的概率也会增大, 这会使得 OFDM 信号中出现峰值很大的点, 为了定义这种叠加幅值的变化特性, 研究者采用了峰均比来表述该特性, 其定义为

$$PAPR = 10 \lg \frac{\max\{|\mathbf{x}_n|^2\}}{E\{|\mathbf{x}_n|^2\}} \text{dB}. \quad (2)$$

式中: $\max\{|\mathbf{x}_n|^2\}$ 表示 OFDM 信号的峰值功率; $E\{|\mathbf{x}_n|^2\}$ 表示 OFDM 信号的期望, 即平均功率。

根据中心极限定理, 当系统子载波数目足够大且子载波间的存在都相互独立时, OFDM 信号满足高斯分布, 信号幅度满足瑞利分布。所以 OFDM 信号的 PAPR 值大于某一固定值的概率可表示为

$$P_i\{PAPR > A\} = 1 - (1 - e^{-A})^{\alpha N}. \quad (3)$$

式中: A 表示 PAPR 的门限值; α 表示过采样因子。

由峰均比定义可知 OFDM 子载波在同相叠加时是一随机过程, 所以对于不同 OFDM 信号的峰均比也是一随机过程。为直观表述 OFDM 信号峰均比, 研究者引入了统计学中的累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF) 和互补累积分布函数

(complementary cumulative distribution function, CCDF) 表述 OFDM 信号的峰均比分布情况。互补累积分布函数是指 OFDM 信号峰均比大于某一特定峰均比的概率, CDF 与 CCDF 两者间的关系描述为 $CDF=1-CCDF$ 。

根据 OFDM 信号特性, 其最大优势为信道划分的自适应性强, 由初始的宽带信号转化为一定数目的正交子信道, 表明每一个子信道可以根据信道的自身条件来确定在该子信道上传输信号的调制方式及功率大小的分配, 但 OFDM 信号峰均比过高的问题依旧是该领域中需要妥善解决的难题。

2 部分传输序列算法

PTS 算法的核心思想, 是将需发送的数据按设定子块分组方式进行分割, 生成多个符号子块, 再对每个符号子块进行点数相同的 IFFT 运算。然后将得到的符号子块与设定的相位进行遍历相乘, 选择其中峰均比最低的一组信号进行传输^[7]。PTS 算法的符号分组方式有随机分组、顺序分组和交织分组 3 种。3 种分组方式的降峰均比效果以随机分组最佳, 交织分组次之, 顺序分组最差。PTS 算法的具体处理过程如下:

1) 将 OFDM 调制符号 $\mathbf{X}=[X_1, X_2, \dots, X_M]$ 按子块大小为 K 进行分割, 得到 V ($V=N/K$) 组数据符号, 每个子块的数据符号表示为 \mathbf{X}_v ($v=1, 2, \dots, V$)。

2) 对各子块进行 IFFT 得到时域 OFDM 符号, 即 $\mathbf{x}_v=IFFT(\mathbf{X}_v)$, 再调整相位, 使用相位因子 $\{\mathbf{b}_v=e^{j\theta_v}, v=1, 2, \dots, V\}$ 与 \mathbf{x}_v 进行遍历相乘得到 $\mathbf{x}'_v = \sum_{v=1}^V \mathbf{b}_v \mathbf{x}_v$ 。

3) 对遍历相乘之后得到的每一组符号的峰均比进行比较, 选择峰均比最小的一组进行传输, 即

$$\{\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_v\} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_v} \left(\max_{1 \leq n \leq N} \left| \sum_{v=1}^V \mathbf{b}_v IFFT\{\mathbf{X}_v\} \right| \right) \quad (4)$$

其中 $\operatorname{argmin}()$ 表示对遍历乘积之后取最小峰均比的判决条件。

PTS 算法不仅在降峰均比方面有显著效果, 而且在降低峰均比的过程中不会使信号失真。但在该算法系统中发送信号必需携带一定的边带信号以帮助接收端对信号进行解调, 且算法复杂度会随着子块的数量及可选相位因子数量的增加而呈现指数性增长, 导致该算法不适用于子载波数目过大的系统。

3 次优 PTS-Clipping 联合算法

3.1 基于门限的次优 PTS

对于传统 PTS 算法, 降峰均比性能与相位因

子个数的选取有直接关系, 可选相位因子个数越多 PTS 算法性能越优, 同时算法复杂度越高。当可选相位因子个数为 δ 、子块数目大小为 V 时, 会出现 δ^V 种相位组合, 即随着可选相位因子 δ 的增加, 相位组合数目会呈指数形式增长, 这是制约 PTS 实用性的最大障碍。图 1 为次优 PTS-Clipping 联合算法流程抑制 PAPR 处理流程图, 其中次优 PTS 部分的基本流程与传统 PTS 算法类似, 但在相位因子组合的选取上进行优化, 使得选取的相位因子组合数目降低, 舍弃部分相位组合, 从而降低 PTS 算法在遍历过程中的计算量, 使得算法复杂度降低。

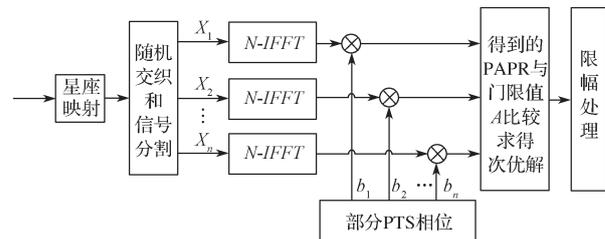


图 1 次优 PTS-Clipping 联合算法流程

Fig. 1 Joint algorithm flow of suboptimal PTS-Clipping

基于门限的次优 PTS 算法基本步骤如下: 1) 设置次优 PTS 的 PAPR 初始门限值为 A , 可选相位因子个数为 δ , 子块数目为 V 。可得 δ^V 组总相位组合, 相位组合表示为 $n_i, i \in [1, 2, \dots, \delta^V]$ 。2) 定义整数常量 S ($S > 2$), 将 n_i 组相位组随机分为 S 块, 每一块中含 δ^V/S 组相位, 用 β_j 表示每个相位组块, $j \in [1, 2, \dots, S]$ 。3) 将随机交织后的 OFDM 信号与 β_1 块中的第一组相位相乘, 即与 $[n_1, n_2, \dots, n_{\delta^V/S}]$ 中的 n_1 相乘, 并计算出 PAPR。将得到的 PAPR 与初始门限 A 比较, 若 PAPR 大于 A 则舍弃, 并将 OFDM 信号与 β_1 中的下一组相位因子 n_2 相乘, 并比较 PAPR。依次迭代, 直到出现第一个小于门限值 A 的 PAPR, 停止迭代, 将该 PAPR 值作为次优解。4) 如果 β_1 块中没有小于门限值 A 的 PAPR 出现, 则选出 β_1 组中的最低 PAPR, 并将其替代 A 作为门限值。然后选取 β_2 块, 若迭代计算块数小于 $S/2$, 则重复第 3 步迭代求 PAPR 并比较的过程; 若大于 $S/2$ 时, 则停止迭代并选取更新后的门限值 A 作为次优解。

在次优 PTS 算法中, 因相位组合数目远低于传统 PTS 的, 根据上述分析可得次优 PTS 算法复杂度要小于传统 PTS 算法的 $1/2$, 且 S 取值越大算法复杂度越低, 但 PAPR 性能也随之降低。根据后面的仿真分析, 当 S 取 8 时该算法降低 PAPR 性能要比传统 PTS 算法高约 0.3 dB, 但在算法复杂度上明显降低。

3.2 限幅处理

限幅处理是通过设定限幅值对信号进行处理: 当信号某处峰值大于该限幅值时将该限幅值替代该处峰值; 信号某处峰值小于该限幅值的不作处理, 且信号处理过程中信号相位保持不变。限幅信号可表示为

$$U_i(n) = \begin{cases} U_i(n), & |U_i(n)| \leq \gamma; \\ \gamma e^{j\theta}, & |U_i(n)| > \gamma. \end{cases}$$

式中: γ 为限幅算法的门限; $U_i(n)$ 为数据信号; $e^{j\theta}$ 为信号相位。

由限幅处理特性可知, 该算法在降低 OFDM 信号 PAPR 上, 其复杂度远优于其他传统算法, 且不受子载波数目影响, 即不会随着子载波数目的增大而出现算法复杂度暴增现象。但限幅处理是非线性畸变过程, 会使信号在限幅过程中出现非线性失真, 从而引入带内失真及带外扩展, 导致通信系统的误码率恶化, 降低整个系统性能。且研究人员发现限幅中削掉的信号功率大小与引入噪声功率有关^[10], 即削去的信号功率越大, 引入的噪声功率越大。所以在限幅门限值过低时, 非线性畸变尤为明显。但若将限幅信号功率控制在较小范围内, 则限幅处理的优越性会明显提升。根据这一特性, 当信号均值较高时, 采用限幅算法处理信号会使得削掉的信号功率明显降低, 引入噪声功率大大降低。原始 OFDM 信号与经过次优 PTS 算法处理的 OFDM 信号波形见图 2。

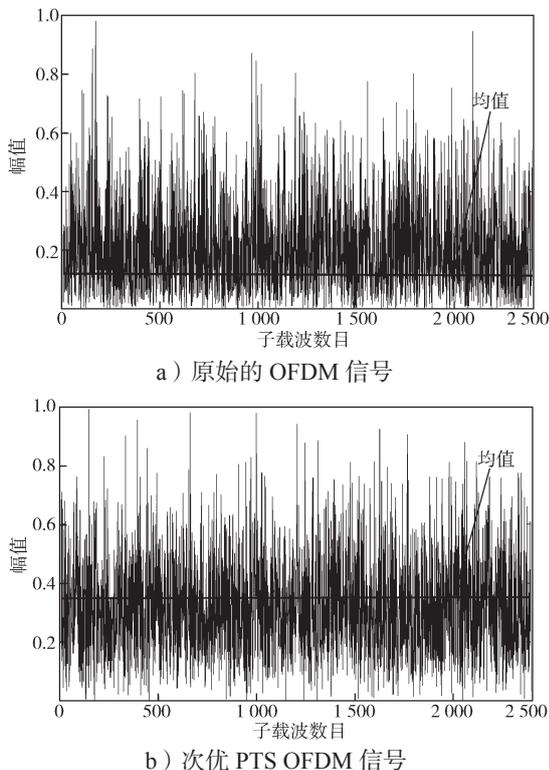


图2 归一化后的 OFDM 信号图
Fig. 2 Normalized OFDM signals

由图 2 不难看出, 原始 OFDM 信号均值为 0.153, 而经过次优 PTS 处理后的信号均值为 0.375, 即采用次优 PTS 算法处理后的信号均值功率得到较大提升。根据峰均比定义可知, 在峰均比一定时, 信号均值功率 $E\{|x_n|^2\}$ 越高, 其对应的峰值功率 $\max\{|x_n|^2\}$ 可以更高。因此, 采用限幅方法进行信号二次处理时, 仅需削掉少量的大功率信号, 即引入较低的边带噪声就可达到降低 PAPR 效果。此外, OFDM 信号在经过次优 PTS 处理后, 均值提升使得削掉的信号功率降低, 从而减少限幅带来的引入边带噪声过大问题, 使信号限幅后的非线性失真减少, 接收端误码率降低。相比传统 PTS 算法与限幅算法, 不仅算法复杂度降低, 其 PAPR 也得到很好的收敛。

4 联合算法仿真分析

对次优 PTS-Clipping 联合算法进行 Matlab 仿真, 仿真参数设置如下: OFDM 符号数 $M=2\ 400$, 调制方式为 16QAM, 子载波数目 $N=200$, IFFT 取 512 点, CP 为 128。实验中的可选相位因子为 $b=[1, -1, j, -j]$, 子块大小为 4, 即相位因子组合共有 256 组; $S=8$, 次优 PTS 算法采用随机交织。根据子载波数目取次优 PTS 的门限值为 8 dB, 削峰的门限值取 $T=0.065$ 。图 3 所示为接收信号的星座图。

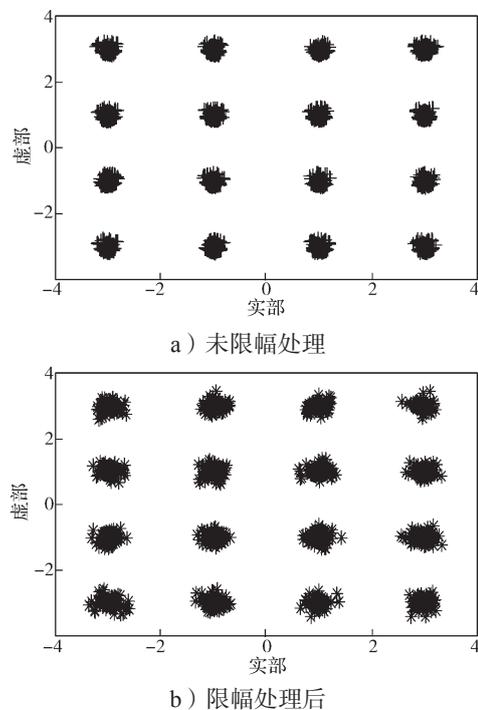


图3 限幅处理前后的信号星座图

Fig. 3 Signal constellation before and after limiting processing

比较图 3 所示未限幅处理与限幅处理后的信号星座图可知, 限幅处理引入了部分边带噪声。但该边带

噪声不影响星座图的完整性,接收端只需进行最大似然判决就可恢复原始信号。

图4为OFDM信号峰均比的互补累积分布函数(complementary cumulative distribution function, CCDF)分布曲线。相比于传统PTS算法,基于门限的次优PTS算法的PAPR仅高0.3 dB左右,但其算法复杂度却大幅度降低。次优PTS-Clipping联合算法的PAPR相比于传统PTS算法降低了1 dB,对OFDM系统的PAPR得到了较大的优化。由于限幅算法易于实现的特性,因此联合算法的总体复杂度低于传统PTS算法。此外,随着子载波数与可选相位因子数的增加,联合算法的复杂度不会出现传统PTS算法的指数性增长问题。

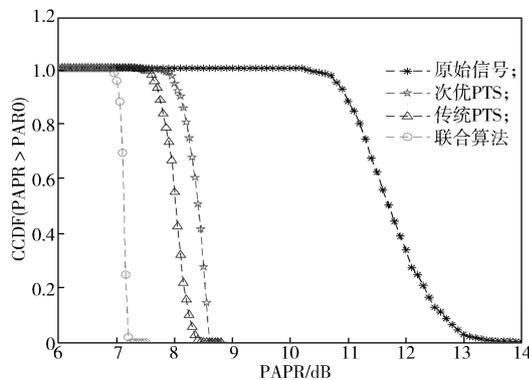


图4 PAPR的CCDF分布

Fig. 4 CCDF distribution of PAPR

由于传统PTS算法在进行相位因子搜索时采用的是最优遍历搜索,算法复杂度会与子块大小及可选相位因子的数目成指数关系,而次优PTS-Clipping联合算法对相位进行了优化分组处理,使得遍历搜寻时的相位组合减少。当符号数 M 取2400, S 设定为8,子块大小与可选相位因子分别取4时,两种算法的复杂度比较结果如表1所示。由表1可知,因为采用了随机交织,所以次优PTS-Clipping算法的复杂度大为降低。

表1 两种算法的复杂度比较

Table 1 Comparison of the complexities of two algorithms

算法	复杂度
传统PTS	Complexity= $M \cdot 4^4 = 614\ 000$
次优PTS-Clipping	Complexity $\leq \frac{4 \cdot M}{S} \cdot 4^4 + 2\ 400 = 309\ 600$

5 结语

为降低OFDM信号峰均比,本文提出了一种基于门限的次优PTS-Clipping联合算法,并对现有降

低PAPR算法进行了仿真分析与比较。仿真结果表明,与传统PTS算法相比,所提出的次优PTS-Clipping联合算法的复杂度降低了近一半,PAPR性能约降低了1 dB,误比特率也优于传统限幅算法的。可见,联合算法不仅有效降低了OFDM系统的峰均比,而且解决了传统PTS算法的复杂度过高和传统限幅算法边带噪声引入过大等问题。

参考文献:

- [1] ZHANG L, IJAZ A, XIAO P, et al. Multi-Service System: An Enabler of Flexible 5G Air Interface[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(10): 152-159.
- [2] 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.
- [3] SANDOVAL F, POITAU G, GAGNON F. Hybrid Peak-to-Average Power Ratio Reduction Techniques: Review and Performance Comparison[J]. IEEE Access, 2017, 5: 27145-27161.
- [4] KIM M, LEE W, CHO D H. A Novel PAPR Reduction Scheme for OFDM System Based on Deep Learning[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 22(3): 510-513.
- [5] SOHN I, KIM S C. Neural Network Based Simplified Clipping and Filtering Technique for PAPR Reduction of OFDM Signals[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(8): 1438-1441.
- [6] PACHORI K, MISHRA A. An Efficient Combinational Approach for PAPR Reduction in MIMO-OFDM System[J]. Wireless Networks, 2016, 22(2): 417-425.
- [7] CHEN H, CHUNG K C. A PTS Technique with Non-Disjoint Sub-Block Partitions in M-QAM OFDM Systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2017, 64(1): 146-152.
- [8] JOO H S, KIM K H, NO J S, et al. New PTS Schemes for PAPR Reduction of OFDM Signals Without Side Information[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2017, 63(3): 562-570.
- [9] CHEN H, CHUNG K C. A Low Complexity PTS Technique Using Minimal Trellis in OFDM Systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 64(1): 817-821.
- [10] MESTDAGH D J C, SPRUYT P, BIRAN B. Analysis of Clipping Effect in DMT-Based ADSL Systems[C]// Processing IEEE ICC'94. New Orleans: IEEE, 1994: 843-847.

(责任编辑:廖友媛)