一种改进的降低 MIMO-OFDM 系统峰均比的联合算法 *

蒋 阳, 袁 敏, 陈碧云, 王 权
(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 多输入多输出频分复用(MIMO-OFDM)技术是将 OFDM 与 MIMO 技术相结合的无线通信系统,它在继承 OFDM 与 MIMO 技术诸多优点的同时,具有 OFDM 系统存在的峰均比(PAPR)较高的问题。选择性映射法(SLM)和预留子载波保留算法(TR)具有很好地抑制 PAPR 的性能,但是把传统的 TR 或 SLM 方法直接运用到 MIMO-OFDM 系统中却难以达到很好地抑制 PAPR 效果。为了寻求在 MIMO-OFDM 系统中改善 PAPR 性能的同时降低算法实现复杂度,提出一种 TR 与 SLM 算法相结合的适合 MIMO-OFDM 系统的改进算法 TR-SLM。通过理论分析与仿真结果表明,TR-SLM 级联算法不仅能有效抑制 MIMO-OFDM 系统的 PAPR,同时可减小算法的计算复杂度与系统实现的复杂度。

关键词: 多输入多输出; 正交频分复用; 峰均比; 选择映射; 预留子载波
中图分类号: TN919.3; TP301.6 **文献标志码**: A **文章编号**: 1001-3695(2012)01-0250-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.01.069

Modified united algorithm for reducing PAPR of MIMO-OFDM system

JIANG Yang, YUAN Min, CHEN Bi-yun, WANG Quan
(*College of Communication Engineering*, *Chongqing University*, *Chongqing* 400044, *China*)

Abstract: The major drawback of multiple input multiple output orthogonal frequency division multiplexing system (MIMO-OFDM) is its high peak-to-average power ratio (PAPR). Selected mapping (SLM) and tone reservation (TR) has good PAPR reduction performance, but it will be very complicated if the traditional method of TR or SLM is directly applied in MIMO-OFDM systems. In order to solve this problem, this paper proposed an improved TR-SLM method: simple TR algorithm combined the SLM algorithm that the transmission of side information was reduced. The proposed method further reduced the system PAPR, but also significantly reduced the computational complexity of the system. Theoretical analysis and simulation results show that the improved TR-SLM algorithm can effectively suppress PAPR, at the same time it reduce the algorithm complexity and system complexity.

Key words: multiple input multiple output(MIMO); orthogonal frequency division multiplexing(OFDM); peak-to-average power ratio(PAPR); selected mapping(SLM); tone reservation(TR)

0 引言

在宽带频率选择性多径衰落信道中,将 OFDM 与 MIMO 技术相结合可以大幅度地提高系统性能,实现高性能、高频谱效率的通信[1]。但是,由于 MIMO-OFDM 系统使用 OFDM 调制方式,它在继承 OFDM 调制的诸多优点的同时,也不可避免地继承了 OFDM 调制较高峰值平均功率比(peak to average power ratio,PAPR)等问题[2]。PAPR 高就要求其功率放大器必须具有很大的动态范围,否则会产生严重的非线性失真,导致信号畸变,产生子载波间的互调干扰和带外辐射,破坏子载波的正交性,从而严重影响 MIMO-OFDM 系统的性能[3]。

由于 MIMO-OFDM 系统的每一个天线支路都采用 OFDM 技术,因此每根天线上也都存在着峰均功率比高的问题[4]。与传统的 SISO-OFDM 系统的峰均比问题相比,MIMO-OFDM 由于天线数量的增加,其 PAPR 问题变得更加复杂,难以使用传统的 SISO-OFDM 系统的方法加以处理[5]。本文从兼顾多天线系统中的降低 MIMO-OFDM 系统 PAPR 效果与算法实现复杂度为出发点,提出一种能在有效降低系统传输的冗余信息的同时达到降低峰均比效果的 TR-SLM 级联算法。

1 MIMO-OFDM 系统 PAPR 定义

假设在一个 MIMO-OFDM 系统中,有 N_{tx} 个发射天线、N_{rx} 个接收天线,每个天线支路上有 N 个子载波。在信号发射之前都会有一个高功率放大器(HPA)对信号进行放大,因此高功率放大器(HPA)的非线性也会对具有高峰值功率的信号造成影响。

令 $X_i = [X_{i,0}, X_{i,1}, \cdots, X_{i,N-1}]$ 表示分配给第 i 根发射天线发送的数据序列,那么经过 IFFT 变换后,在第 i 根天线上发射

收稿日期: 2011-05-06; **修回日期**: 2011-06-13 **基金项目**: 国家科技重大专项基金资助项目(2010X03004002);重庆大学研究生科技创新基金资助项目(CDJXS11160020)

作者简介:蒋阳(1963-),男,四川广安人,副教授,主要研究方向为通信工程、EDA 技术、计算机应用等(jy@cqu.edu.cn);袁敏(1987-),女,四川彭山人,硕士研究生,主要研究方向为宽带移动通信;陈碧云(1986-),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络能量均衡;王权(1987-),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络路由协议.

的时域信号[6]可表示为

$$x_{i,n}=\frac{1}{\sqrt{N}}\sum_{k=0}^{N-1}X_{i,k}e^{j2\pi nk/N}\quad n=0,1,\cdots,N-1 \tag{1}$$

则 MIMO-OFDM 系统中第 i 根天线上发射信号的峰均功率比定义为

$$\mathrm{PAPR}(x_i)=\frac{\max\limits_{0\leqslant n\leqslant N-1}[|x_{i,n}|^2]}{E[|x_{i,n}|^2]} \tag{2}$$

2　改善 MIMO-OFDM 系统 PAPR 性能方法

目前,常用的降低 MIMO-OFDM 系统 PAPR 的方法主要是直接将现有的降低 OFDM 系统 PAPR 的方法分别应用到 MIMO-OFDM 系统的每根发射天线上,主要采用的技术有限幅类技术、编码类技术和扰码类技术[7]。

本文主要针对概率类技术进行研究,寻求一种复杂度低且对 MIMO-OFDM 系统 PAPR 有较好的抑制效果的算法。概率类技术不需要降低信号幅度的最大值,对信号本身不产生任何影响,而是降低峰值出现的概率,最基本的方法就是将原始信号 $x(n)$ 的频域数据序列通过如式(3)所示的线性变换[8]:

$$Y_n=A_n\times X_n+B_n\quad 1\leqslant n\leqslant N \tag{3}$$

式中:Y_n 为 IFFT 前输入的 N 点数据向量 $\boldsymbol{Y}$ 的元素,X_n 为原始频域数据向量 $\boldsymbol{X}$ 的元素。该类方法的目的就是要寻找 N 点向量 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$,从而使得传输的符号 $y=\mathrm{IFFT}(Y)$ 具有较低概率的峰值。属于这类技术的最典型的算法有选择映射(SLM)、部分传输序列(PTS)、脉冲成形(PS)、子载波预留(TR)等。其中 SLM 和 PTS 着眼于选择恰当的 $\boldsymbol{A}$ 向量,而 $\boldsymbol{B}$ 向量为零向量,这两种算法都利用了 N 个 $\boldsymbol{A}$ 向量中的元素具有单位幅度的限制,即 $A_n=e^{j\theta_n}$,$\theta_n\in[0,2\pi]$,$1\leqslant n\leqslant N$,也即为纯的相位旋转;而 *TI* 和 *TR* 方法着眼于优化 $\boldsymbol{B}$ 向量,而 $\boldsymbol{A}$ 向量为单位向量。

3　TR-SLM 联合算法

3.1　简化的 TR 算法

在概率类技术中,TR 算法很容易拓展到 MIMO-OFDM 系统,为了在 MIMO-OFDM 系统中利用 TR 技术降低 PAPR,其保留子载波的位置对于所有发射机天线而言都是一致的,并且对于发射机和接收机而言这些都是已知的[9],而每个发射机天线的 PAPR 各自独立地减少。为了进一步降低系统复杂度,现采用一种简单的子载波预留(TR)技术代替传统的迭代方法来寻找最优的消峰序列[10]。具体实现方法是通过增加一些补充信号(又叫备选信号)来转换原始信号 $X(k)$,构造一种具有特殊结构的不用于传递信息的频域信号,使其与传递有用信息的频域信号进行叠加,通过叠加,大幅度抵消原始信号的峰值,从而可以有效地降低 PAPR。首先定义补充信号 $d(n)$ 如下:

$$d(n)=A-x(n) \tag{4}$$

其中:A 为恒定信号,$x(n)$ 为原始信号。怎样获得最优的补充信号 $d(n)$ 是解决 PAPR 问题的关键。传统 TR 算法在 OFDM 系统中是一种行之有效的方法,但是直接将其运用到 MIMO-OFDM 系统中会增加计算的复杂度,因为 n_t 个发射天线就需要 n_t 次线性优化过程。

在传统的 TR 算法中,输入端的频域信号 $C(k)$ 经过 IFFT 运算后得到时域信号 $c(t)$,频域信号 $C(k)$ 和 $c(n)$ 的关系为

$$C(k)\approx\sum_{k=0}^{N-1}c(n)\exp\left(\frac{-j2\pi kn}{N}\right) \tag{5}$$

其中,$c(n)$ 是时域信号 $c(t)$ 的离散时间抽样。

由式(5)可以联想到傅里叶级数的展开式,现将补充信号 $d(n)$ 用傅里叶级数展开式来表示:

$$d(n)=\sum_{k=-\infty}^{\infty}D_k\exp(j2\pi kt\Delta f) \tag{6}$$

可近似表示为

$$d(n)\approx\sum_{k=0}^{N-1}D_k\exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right) \tag{7}$$

由式(5)和(7)可以看出,TR 算法中发射端的备选信号 $C(k)$ 相当于傅里叶级数展开式中的系数 D_k,因此可以利用傅里叶级数的展开来得到备选信号 $C(k)$。

由此得到改进的 TR 算法,其实现步骤如下:

a)将有效信息进行串并转换,并把转换后的 OFDM 信号映射为频域信号 $X(k)$,$k=(0,1,\cdots,N-1)$;

b)对 $X(k)$ 执行 IFFT 运算得到时域信号 $x(n)$,$n=(0,1,\cdots,N-1)$;

c)获取 $x(n)$ 的补充信号 $d(n)$:

(a)求 $x(n)$ 的峰值

$$\mathrm{MAX}=\max\{|x(0)|,|x(1)|,\cdots,|x(N-1)|\} \tag{8}$$

(b)对其中每个 $n(0\leqslant n\leqslant N-1)$ 求 $d(n)$

$$d(n)=\begin{cases}\mathrm{MAX}-x(n) & x(n)>0\\ -\mathrm{MAX}-x(n) & x(n)\leqslant 0\end{cases} \tag{9}$$

同时 $d(n)$ 满足表达式

$$|d(n)+x(n)|=\mathrm{MAX}\quad 0\leqslant n\leqslant N-1 \tag{10}$$

其中 MAX 为常量;

d)对 $d(n)$ 执行 FFT 变换:

$$\mathrm{FFT}\{d(n)\}=D(k)\quad k=(0,1,\cdots,N-1) \tag{11}$$

由前述可知,$D(k)$ 即为原始信号 $X(k)$ 的补充信号 $C(k)$;

e)将得到的 $D(k)$ 插入到原始信 $X(k)$,对该 $X(k)$ 执行 IFFT 变换,得到发射端的信号 $x(n)$。

对于传统的迭代 TR 方法,每进行一次迭代过程,需要进行一次 IFFT 运算和一次 FFT 运算,如果迭代次数为 n,那么就需要 n 次 IFFT 运算和 n 次 FFT 运算,然后选择其中 PAPR 最小的组合进行传输。而在改进的 TR 方法中,只需要进行一对 IFFT/FFT 运算,明显降低了算法运算量。因此,把该方法直接运用到复杂的多天线系统中,可以明显降低计算复杂度。

3.2　改进的 SLM 算法

由于 TR 算法在实现过程中是不需要传输边带信息的,而 SLM 算法在传输过程中需要传送适量的边带信息,从而造成了频谱利用率的降低。本文采用一种将随机序列插入到信号序列中以改变信号序列的相位一致性,从而达到减小高峰值出现的概率,以此降低系统的 PAPR 的 SLM 改进算法。改进算法中由于是将额外的序列插入到信号序列中,这些插入的序列不含有任何有用信息,在接收端无须恢复处理,可直接将这些比特位丢弃而无须发送边带信息就可以无失真地恢复原始信号[11,12]。

改进的 SLM 算法中序列的插入方法也不是一般的补偿序列插入方法,而是把每个输入数据序列分成 K 段,把每段看成一个输入数据序列进行补偿序列插入(每段的末尾插入扰码),其实现的原理框图[13]如图 1 所示。

3.3　联合算法的结构

如 3.1 节所述,若在 MIMO-OFDM 系统直接采用简化的 TR 算法,虽然复杂度降低,但降低 PAPR 的效果可能不是很理

想;而如果将选择性映射(SLM)算法直接应用到 MIMO-OFDM 系统的各个天线上,不仅计算量大,而且增加了边带信息传输量, 从而降低了有效数据的传输效率。为了在 MIMO-OFDM 系统中寻求改善 PAPR 性能与降低算法实现复杂度的更好的折中方法,现将改进的简单 TR 算法与减少边带信息传输的 SLM 两种方法相融合构成 TR-SLM 级联算法,只要选择式(3)中合适的向量 A 和 B,使各子载波符号具有一定的相关性,则可达到进一步降低峰均比,改善系统峰均比性能的目的。TR-SLM 联合算法框图如图 2 所示。该算法主要思想是:先利用 TR 对数据进行处理,之后再用 SLM 方法进一步优化。

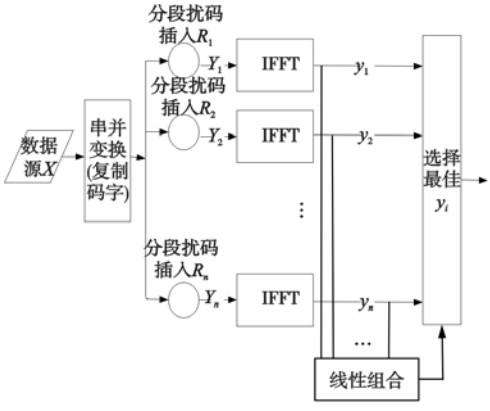

图1　改进后的SLM原理

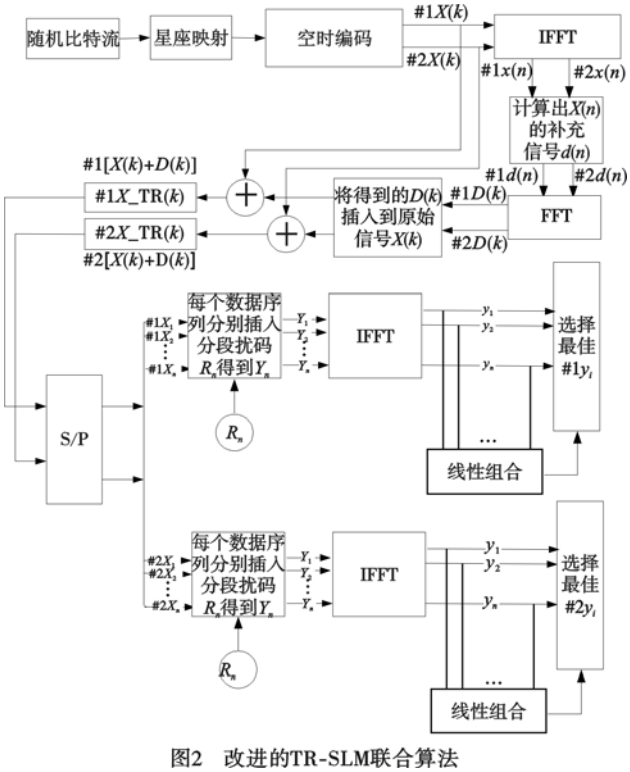

图2　改进的TR-SLM联合算法

4　联合算法仿真分析

改进 TR 算法和不需要边带信息的 SLM 算法对降低峰均比都有较显著的效果。下面以两输入天线为例,通过对各种性能参数的仿真来分析 TR-SLM 算法降低峰均比的效果。仿真时设置的参数为:系统含有 128 个子载波,使用 16QAM 调制,4 倍过采样,10000OFDM 符号,SLM 算法中 $V=8$。通过仿真得到的传统 TR-SLM 算法与改进 TR 算法和传统 SLM 算法相结合的 CCDF 函数曲线如图 3 所示。可以看出相对于传统 TR-SLM 算法,改进的 TR 算法与传统 SLM 算法相结合虽然降低了技术复杂度,却没有进一步降低 PAPR。

如果将传统 TR 算法与改进 SLM 算法相结合,与传统 TR-SLM 算法仿真对比的 CCDF 函数曲线如图 4 所示。相对于传统 TR-SLM 算法,改进 SLM 算法的 PAPR 降低了 0.5 dB,但计算复杂度却没有改善。

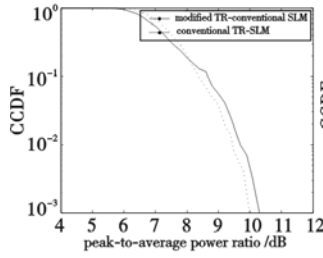

图3　传统TR-SLM算法与改进的TR-传统SLM的CCDF

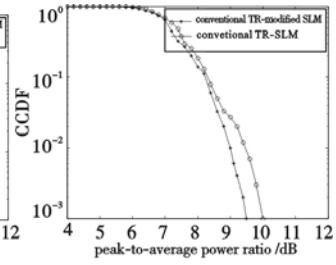

图4　传统TR-SLM算法与传统TR-改进SLM的CCDF

以上理论分析及仿真结果说明,本文采取的改进级联 TR-SLM 方法在进一步降低 PAPR 的同时改善了计算复杂度。通过仿真得到的改进 TR-SLM 算法与单独的 TR 算法和 SLM 算法的 CCDF 函数曲线如图 5 所示。

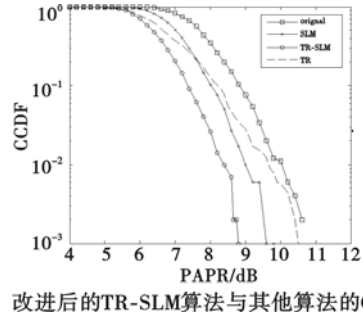

图5　改进后的TR-SLM算法与其他算法的CCDF

从图 5 中可以看出,相对于原信号而言,TR 算法 PAPR 降低了约 0.5 dB,SLM 算法 PAPR 降低了约 1.5 dB,而 TR-SLM 级联算法 PAPR 降低了约 2 dB,由此可见同样条件下,TR-SLM 级联算法比单独的 TR 算法降低了 2 dB,比单独的 SLM 算法降低了 1 dB 左右,因此 TR-SLM 级联算法明显降低了峰均比。

分析联合算法的复杂度,如 3.1 节所述,简化的 TR 算法中,只需要进行一对 IFFT/FFT 运算,其算法运算量接近传统 TR 算法的 $1/K$(其中 K 为传统 TR 算法中的迭代次数)。而改进 SLM 算法中定义计算复杂度减少率[7]为

$$\mathrm{CCRR}=\left(1-\frac{\text{改进 SLM 方案计算量}}{\text{传统 SLM 方案计算量}}\right)\times 100\% \tag{12}$$

由 SLM 复数乘法与复数加法的计算量见表 1。

表 1　改进 SLM 方案与传统 SLM 方案计算量对比

对比项	传统 SLM 方案	改进 SLM 方案	CCRR/%
IFFT 个数	8	8	
备选时域序列	8	232	
复数乘法	59 392	15 872	73
复数加法	89 088	17 408	80.5

由表 1 可以得出,当改进 SLM 方案取 $V=8$ 个 IFFT,能通过线性组合得到 232 个时域数据序列,此时改进 SLM 方案需要的复数乘法次数为 15 872 次,复数加法次数为 17 408 次。通过定义的计算复杂度减少率 CCRR 得出,在同一 PAPR 抑制效果条件下,改进 SLM 方案与传统 SLM 方案相比,复数乘法计算量减少了 73%,复数加法计算量减少了 80.5%。综上所述,改进的 TR-SLM 级联算法在计算复杂度上的降低是明显的,应用到多天线的系统中可以大大降低系统复杂度。

(下转第 277 页)

参考文献:

[1] FALL K. A delay-tolerant network architecture for challenged Internets[C]//Proc of Conference on Applications Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York: ACM Press, 2003: 27-36.

[2] The network simulator NS-2[EB/OL]. (2010-05). http://www.isi.edu/nsnam/ns/.

[3] VARGA A. The OMNET ++ discrete event simulation system[C]// Proc of the European Simulation Multiconference. 2001: 319-324.

[4] JAIN S, FALL K, PATRA R. Routing in a delay tolerant network [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2004, 34(4): 145-158.

[5] University of Waterloo. DTNSim2 delay-tolerant network simulator [EB/OL]. (2010-05). http://watwire.uwaterloo.ca/DTN/sim/.

[6] HUI Pan, CHAINTREAU A, SCOTT J, *et al*. Pocket switched networks and human mobility in conference environments[C]//Proc of ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. New York: ACM Press, 2005.

[7] EAGLE N, PENTLAND A. Reality mining: sensing complex social systems[J]. Personal Ubiquitous Computing, 2006, 10(4): 255-268.

[8] Community resource for archiving wireless data at dartmouth [EB/OL]. (2010-03). http://crawdad.cs.dartmouth.edu/.

[9] Diot. Haggle project[DB/OL]. (2004). http://www.haggleproject.org.

[10] CHOFFNES D R, BUSTAMANTE F E. An integrated mobility and traffic model for vehicular wireless networks[C]//Proc of the 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad hoc Networks. New York: ACM Press, 2005.

[11] JOHNSON D B, MALTZ D A. Dynamic source routing in Ad hoc wireless networks[M]. [S. l.]: Kluwer Academic Press, 1996.

[12] Le BOUDEC J Y L, VOJNOVIC M. Perfect simulation and stationarity of a class of mobility models[C]//Proc of the 24th anual Joint Conference on IEEE Computer and Communications Socitices. 2005: 2743-2754.

[13] KURKOWSKI S, CAMP T, MUSHELL N, *et al*. A visualization and analysis tool for NS-2 wireless simulations[C]//Proc of the 13th IEEE International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems. 2005: 503-506.

[14] JANERT P K. Gnuplot in action-understanding data with graphs [M]. [S. l.]: Manning Press, 2009.

[15] KERÄNEN A, OTT J, KÄRKKÄINEN T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation[C]//Proc of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques. 2009.

[16] TKK/COMNET. Project page of the ONE simulator[EB/OL]. (2008). http://www.netlab.tkk.fi/tutkimus/dtn/theone.

[17] TKK/COMNET. Project page of the ONE simulator[EB/OL]. (2008). http://www.netlab.tkk.fi/tutkimus/dtn/theone/javadoc_v141.

[18] EKMAN F, KERÄNEN A, KARVO J, *et al*. Working day movement model[C]//Proc of the 1st ACM Press/SIGMOBILE Workshop on Mobility Models. NewYork: ACM, 2008.

[19] Well known text[EB/OL]. (2011-03). http://en.wikipedia.org/wiki/well-known_text.

[20] Wiki.openstreemap[EB/OL]. (2011-03). http://www.openstreetmap.org.

[21] LEGUAY J, LINDGREN A, SCOTT J, *et al*. Opportunistic content distribution in an urban setting[C]//Proc of SIGCOMM Workshop on Challenged Networks. NewYork: ACM Press, 2006: 137-145.

(上接第 252 页)

5　结束语

本文提出的 TR-SLM 级联算法,较好地将经过优化的 TR 算法与分段扰码插入的 SLM 算法结合起来,充分利用改进的简化 TR 算法在降低计算复杂度的同时保持其他性能上的优势,以及改进的 SLM 算法在实现过程中不需要传输边带信息的优势,既克服了传统 SLM 算法的缺点,又继承了 TR 算法和 SLM 方案的优点。从仿真结果可知,TR-SLM 级联算法不仅能有效降低系统传输的冗余信息,而且能有效降低峰均比。将 TR-SLM 级联算法用于多天线的 MIMO-OFDM 系统,不仅能达到改善系统峰均比性能的目的,还大大降低了系统复杂度,提高了系统频带利用率,因此算法具有较大的实用价值。

参考文献:

[1] SEUNG H H, JAE H L. An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission[J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(2): 56-65.

[2] YANG L, CHEN R S, SIU Y M, *et al*. PAPR reduction of an OFDM signal by use of PTS with low computation complexity[J]. IEEE Trans on Broadcasting, 2006, 52(1): 83-86.

[3] WANG L, WANG Y. MIMO-OFDM peak-to-averagepower ratio reduction by two-dimensional permutation[J]. Electronics Letters, 2007, 43(10): 579-580.

[4] FOSCHINI G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas [J]. Bell Labs Techical Journal, 1996, 1(2): 41-59.

[5] FISCHER R F H, HOCH M. Peak-to-average power ratio reduction in MIMO OFDM[C]//Proc of IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2007: 762-767.

[6] YUNG L L, YOUNG H Y, WON G J. Peak-to-average power ratio in MIMO-OFDM systems using selective mapping[J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(12): 575-577.

[7] HEO S J, NOH H S, NO J S, *et al*. A modified SLM scheme with low complexity for PAPR reduction of OFDM systems [J]. IEEE Trans on Broadcasting, 2007, 53(4): 804-808.

[8] 王文博,郑侃. 宽带无线通信 OFDM 技术[M]. 2 版. 北京:人民邮电出版社, 2007: 1-251.

[9] 周恩,张兴. 下一代宽带无线通讯 OFDM 与 MIMO 技术[M]. 北京:人民邮电出版社, 2008: 1-177.

[10] HE Xiao-fan, JIANG Tao, ZHU Guang-xi. A novel simplified tone reservation combined with cross antenna rotation and inversion to reduce PAPR for MIMO-OFDM system[J]. Wireless Communication and Mobile Computer, 2010, 11(10): 1406-1414.

[11] MARUYAMA T, MARUTA K, MASHINO J, *et al*. Control information transmission without resource consumption for PAPR reduction of OFDM signal[J]. Electronics Letters, 2009, 45(8): 406-408.

[12] ALSUSA E, YANG L. Selective post-IFFT amplitude randomising for peak-to-average power ratio reduction in orthogonal frequency-division multiplexing-based systems [J]. Communications LET, 2008, 2(4): 553-561.

[13] IRUKULAPATI N V, CHAKKA V K, JAIN A. SLM based PAPR reduction of OFDM signal using new phase sequence[J]. Electronics Letters, 2009, 45(24): 1231-1232.