

# 一种新的降低OFDM系统峰均功率比的方法

荆楠, 王嘉嘉, 肖丽萍

(燕山大学 信息科学与工程学院 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 提出了一种新的降低正交频分复用(OFDM)系统峰均功率比(PAPR)的方法。该方法首先将输入符号对大幅度输出采样信号的贡献程度作为衡量尺度, 根据该尺度确定一定数量的符号进行幅度预矫正以降低 PAPR; 再对幅度大于给定门限的 OFDM 信号进行压缩, 从而进一步降低 PAPR。其中幅度预矫正具有算法简单、灵活的特点, 而部分压缩能比压扩变换更好地保持信号幅度的分布特性。仿真结果表明, 该方法比压扩变换能更有效地降低系统的峰均功率比, 而且具有较小的带外功率。

**关键词:** 正交频分复用(OFDM) 压扩变换 幅度预矫正 峰均功率比(PAPR)

中图分类号: TN911.72, TP84

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2009)07-0028-04

## A New Method to Reduce the Peak-to-average Power Ratio of OFDM

JING Nan, WANG Jia-jia, XIAO Li-ping

(School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

**Abstract:** A new method is proposed to reduce the peak-to-average power ratio(PAPR) of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system. The method is based on amplitude predistortion of the input symbols, the predistorted symbols being selected according to a metric which measures their contribution to the output signal samples of large amplitude. Then the OFDM signal whose amplitude is greater than a given threshold is compressed to reduce more PAPR. The amplitude predistortion algorithm is simple and flexible. And the partial compression can maintain the distribution characteristic of signal amplitude better than companding transform. The simulation results show that the proposed scheme can reduce PAPR effectively with less spectrum side-lobes than companding transform.

**Key words:** orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), companding transform, amplitude predistortion, peak-to-average power ratio(PAPR)

### 0 引言

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)是一种频谱利用率高、抗多径衰落能力强的多载波调制技术,是宽带无线通信的关键技术之一,已被广泛应用于无线通信系统中。但是,峰均功率比(peak-to-average power ratio, PAPR)过高是 OFDM 系统的缺点之一,较高的峰均功率比就要求发射机内功率放大器具有较大的线性动态范围,以避免由于非线性失真而引起的传输信号的频谱扩散及带内失真引起的误比特率的增加,这样就增加了系统实现的难度和成本。为了解决这一问题,国内外学者已提出许多降低 PAPR 的方法,主要有:剪切滤波技术<sup>[1]</sup>、编码技术、选择性映射法<sup>[2]</sup>(SLM)、部分传输序列法(PTS)<sup>[3]</sup>及压缩扩张技术<sup>[4]</sup>等。

本文提出一种新的降低 OFDM 系统 PAPR 的方法,该方法基于幅度预矫正技术<sup>[5-6]</sup>和压缩扩展技术,来实现对 OFDM 系统 PAPR 的降低,最后给出仿真结果和性能分析。

### 1 OFDM 系统 PAPR 的定义

在 OFDM 系统中,经过快速傅里叶逆变换(IFFT)的复基带信号可以表示为:

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi n \frac{k}{N}} \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

式中  $N$  为子载波数,  $X_k (k=0, 1, \dots, N-1)$  为输入数据符号。OFDM 符号的 PAPR 定义为:

$$PAPR(\text{dB}) = 10 \log_{10} \frac{\max\{|x_n|^2\}}{E\{|x_n|^2\}} \quad (2)$$

式中  $E\{|x_n|^2\}$  为 OFDM 符号平均功率。

## 2 幅度预矫正技术与压缩扩展变换

幅度预矫正技术,是一种通过修改部分星座符号的幅度,来减小具有较大幅度的 OFDM 信号,从而降低系统 PAPR 的方法。本文对文献[5-6]中幅度预矫正技术进行改进,以 QPSK 调制为例,星座点幅度预矫正后,如图 1 所示。

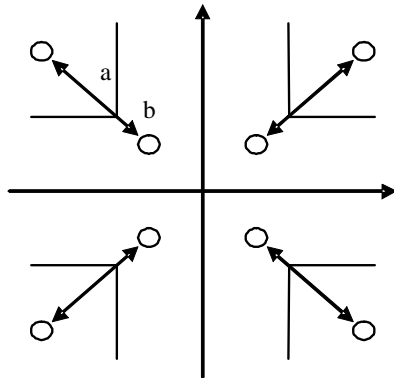


图 1 幅度预矫正后的 QPSK 星座图

Fig. 1 Constellation diagram of QPSK after amplitude predistortion

上图中  $a$  和  $b$  分别为放大因子和缩小因子,并在  $a > 1, 1 > b > 0$  的范围内选取适当实数。在幅度预矫正技术中,角度度量函数  $f(n, k)$  为:

$$f(n, k) = -\cos(\theta_{nk}) \quad (3)$$

式中  $\theta_{nk}$  为  $X_k e^{j2\pi \frac{k}{N}}$  与输出采样信号  $x_n$  之间的角度。对星座符号  $X_k$  进行预矫正的衡量尺度定义为:

$$\mu_k = \sum_{n=0}^{N-1} f^p(n, k) \omega^q(n) \quad (4)$$

式中  $\omega(n) = |x_n|$ , 为  $x_n$  的权重函数,  $p$  和  $q$  一般取 1 和 6。

对输入符号  $X_k$  幅度预矫正后得到  $\hat{X}_k$ , 经 IFFT 变换得到输出信号  $\hat{x}_n$  如下:

$$\begin{aligned} \hat{x}_n &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \hat{X}_k W^{-kn} \\ &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k \notin S_a \cup S_b} X_k W^{-kn} + \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k \in S_a} \hat{X}_k W^{-kn} + \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k \in S_b} \hat{X}_k W^{-kn} \\ &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k \notin S_a \cup S_b} X_k W^{-kn} + \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k \in S_a} \hat{X}_k W^{-kn} + \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k \in S_b} b \hat{X}_k W^{-kn} \\ &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k \notin S_a \cup S_b} X_k W^{-kn} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\left( \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k \in S_a} X_k W^{-kn} + \frac{a-1}{\sqrt{N}} \sum_{k \in S_a} X_k W^{-kn} \right) + \\ &\left( \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k \in S_b} X_k W^{-kn} + \frac{b-1}{\sqrt{N}} \sum_{k \in S_b} X_k W^{-kn} \right) \\ &= x_n + \frac{a-1}{\sqrt{N}} \sum_{k \in S_a} X_k W^{-kn} + \frac{b-1}{\sqrt{N}} \sum_{k \in S_b} X_k W^{-kn} \quad (5) \end{aligned}$$

式中  $W = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ ,  $S_a$  是元素数为  $K_a$  的进行  $a$  倍幅度预矫正的输入符合的下标集合,  $S_b$  是元素数为  $K_b$  的进行  $b$  倍幅度预矫正的输入符合的下标集合。

压缩扩展变换 ( $C$  变换) 方法,是把大功率发射信号压缩,而把小功率信号进行放大,从而可以使得发射信号的平均功率相对保持不变,以实现降低系统 PAPR 的目的。 $\mu$  律压缩扩展是一种常用的方法,在发射端对信号实施压缩扩展操作,而在接收端实施逆操作,恢复原始数据信号。 $C$  变换公式如下:

$$s_n = C\{x_n\} = \frac{V x_n}{\ln(1+\mu)|x_n|} \ln\left(1 + \frac{\mu}{V} |x_n|\right) \quad (6)$$

式中  $V$  表示 OFDM 符号的  $x_n$  的平均幅值,即  $C$  变换的转折点。在接收端进行的  $C$  逆变换公式为:

$$y_n = C^{-1}\{r_n\} = \frac{V' r_n}{\mu |r_n|} \left\{ \exp\left[\frac{|r_n| \ln(1+\mu)}{V'}\right] - 1 \right\} \quad (7)$$

式中  $V'$  表示接收信号  $r_n$  的平均幅值。

## 3 新的降低 PAPR 方法

$\mu$  律压缩是针对信号本身,把功率小的信号进行放大,同时把功率大的信号进行压缩,以达到降低系统 PAPR 的目的,但这种方法较多地改变了原信号的分布特性。为此本文采用部分压缩方案,仅对大幅度信号进行压缩,尽可能保持原信号的分布特性,使其具有较小的带外功率,同时能够有效地降低系统 PAPR。

本文首先对输入符号进行幅度预矫正,来减小有较大幅度的 OFDM 信号,实现对系统 PAPR 的初次降低,然后再对幅度较大的 OFDM 信号进行  $\mu$  律压缩,进一步降低系统 PAPR。系统框图如图 2 所示。

幅度预矫正后的 OFDM 信号  $\hat{x}_n$ , 由公式 (5) 计算得到,然后对该信号进行  $\mu$  律部分压缩,公式如下:

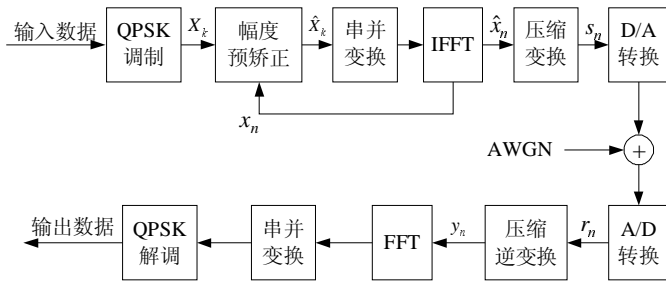


图 2 OFDM 系统框图

Fig. 2 System block diagram of OFDM

$$s_n = \begin{cases} \frac{V\hat{x}_n}{\ln(1+\mu)|\hat{x}_n|} \ln\left(1 + \frac{\mu}{V}|\hat{x}_n|\right) & |\hat{x}_n| > V \\ x_n & |\hat{x}_n| \leq V \end{cases} \quad (8)$$

式中 \$V\$ 表示 OFDM 符号 \$\hat{x}\_n\$ 的平均幅值。由上式可知，仅当信号幅度大于 \$V\$ 时，才对信号进行 \$\mu\$ 律压缩，这样可以在降低系统 PAPR 的同时，更多地保持原信号的分布特性，减小信号带外功率。

在接收端对接收信号实施逆变换，恢复原始信号：

$$y_n = \begin{cases} \frac{V'r_n}{\mu|r_n|} \left\{ \exp\left[\frac{|r_n|\ln(1+\mu)}{V'}\right] - 1 \right\} & |r_n| > V' \\ r_n & |r_n| \leq V' \end{cases} \quad (9)$$

式中 \$r\_n\$ 为经过信道的接收信号；\$V'\$ 表示接收信号 \$r\_n\$ 的平均幅值。

#### 4 仿真及性能分析

仿真采用 QPSK 调制方式，子载波数为 256，主要对本文方法、压扩法及幅度预矫正法三种方法进行性能比较，其中幅度预矫正法中的参数分别取 \$a=1.6\$、\$b=0.8\$、\$K\_a=40\$ 及 \$K\_b=20\$。

图 3 给出了本文方法、压扩变换法、幅度预矫正法以及原始信号的互补累积分布函数 (CCDF) 曲线对比图。仿真采用 4 倍过采样。从图中可以看出，在互补累积分布函数为 \$10^{-3}\$ 处 \$\mu=1\$ 时压扩法的 PAPR 性能比幅度预矫正法低 0.6dB；当 \$\mu\$ 分别取 1、3、5 时，本文方法比压扩法的 PAPR 性能分别低 1.7dB、1dB、0.8dB，由此可见，新的方法能够比压扩法更加有效地降低系统 PAPR。

图 4 给出了在 \$\mu=3\$ 时利用本文方法和压扩变换后的信号功率谱，其中图 a 为利用本文方法的信号功率谱，图 b 为压扩变换后的信号功率谱。从图中可以看出，采用本文方法处理后的信号带外功率比压扩变换

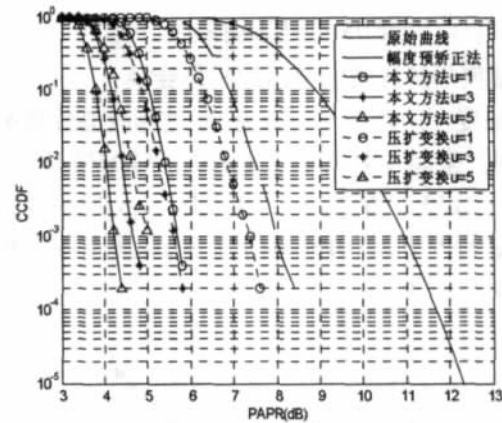
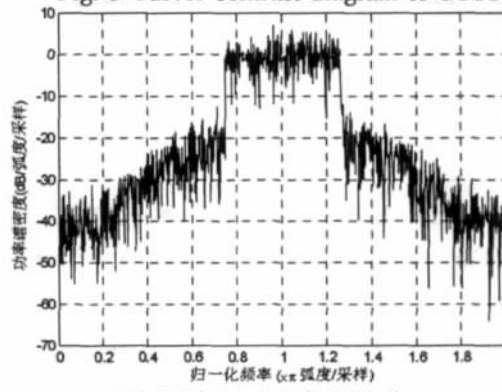
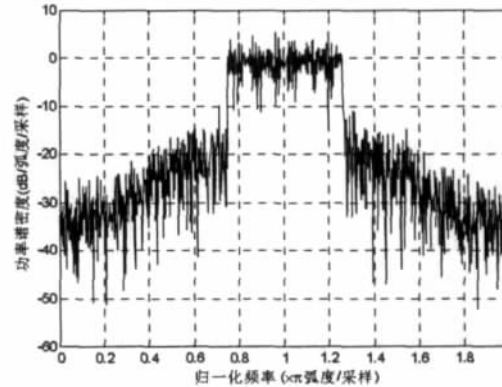


图 3 CCDF 曲线对比图

Fig. 3 Curver contrast diagram of CCDF



(a) 利用本文方法的信号功率谱



(b) 压扩变换后的信号功率谱

图 4 两种方法下的信号功率谱

Fig.4 Signal's power density spectrum of two methods

后的较小，这是由于新的方法仅对大幅度信号进行压缩，不对小幅度信号扩展，可以更好地保持原信号的分布特性，减少信号畸变部分，从而使信号具有较小的带外功率。

#### 5 结束语

本文提出一种新的降低 OFDM 系统 PAPR 的方法。该方法继承了幅度预矫正法能够减小部分峰值信号的特点以及压扩法良好的压缩特性，同时由于仅对大

幅度信号进行压缩,不对小幅度信号扩展,能够更好地保持信号的分布特性,减少信号畸变部分。仿真结果表明,与压扩法相比,本文方法能够更加降低系统 PAPR,而且具有较小的带外功率,可以有效改善系统性能。

### 参考文献

[1]Josef Urbaf, Roman Marsalek. PAPR reduction by combination of interleaving with repeated clipping and filtering in OFDM [C]. 2007 17th International Conference Radioelektronika. NJ:IEEE, 2007: 4234253.

[2]Seok- Joong Heo, Hyung- Suk Noh, Jong- Seon No, et al. A modified SLM scheme with low complexity for PAPR reduction of OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2007,53(4):p 804- 808.

[3]王林,江秀萍.降低PTS方法复杂度的原理及应用[J].电子与信息学报, 2007,29(11):2586- 2588.

Wang Lin, Jiang Xiu-ping. The principle and application to the reduction of PTS' complexity [J].Journal of Electronics and Information Technology,

2007,29(11):2586- 2588.

[4]Tao Jiang, Guangxi Zhu. Nonlinear companding transform for reducing peak- to- average power ratio of OFDM signals [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2004,50(3):342- 346.

[5]Serdar Sezginer, Hikmet Sari. Peak power reduction in OFDM systems using dynamic constellation shaping [C]//Proceedings of EUSIPCO 2005, September 2005,Antalya, Turkey.

[6]Serdar Sezginer, Hikmet Sari. OFDM peak power reduction with simple amplitude predistortion [J]. IEEE Communications Letters, 2006,10 (2): 65- 67.

作者简介:

荆楠(1986-),女,讲师,硕士,主要研究方向为OFDM技术。

Email :xjwl@ysu.edu.cn。

王嘉嘉(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为OFDM技术。

肖丽萍(1963-),女,副教授,博士研究生,主要研究方向为OFDM技术,空时编码技术,扩频序列设计。Email :lxiao@ysu.edu.cn

收稿日期 2009- 01- 06

(田春雨 编发)

(上接第 12 页)

按最大、一般和最小三种运行方式分别进行计算。经计算节点3、6、10为补偿点,补偿容量分别为150kVar、180kVar、211kVar。补偿前和补偿后的各节点电压及有功损耗计算结果如表4和表5所示。

由表4和表5可看出,补偿后,各节点电压有所改善,电压合格率为1,并且网损降低。

表 5 补偿前后有功损耗变化

Tab.5 Power loss change

	最小方式	一般方式	最大方式
补偿前 $\Delta P/kW$	30.0552	59.9803	102.639
补偿后 $\Delta P/kW$	26.3501	51.2474	96.8132

### 6 结 论

本文针对辐射型配电网的线路特点,提出的基于潮流计算和无功精确矩的无功补偿方法,经过算例验证,切实可行,效果较好。这种方法计算简单,实用性强,计算量小。采用的三种运行方式符合实际运行情况。根据最小运行方式确定补偿容量可以避免线路轻载时向各根节点倒送无功功率。当电压合格率不满足时,按电压最低点选取新的补偿点,有助于提高线路节点的电压水平。

### 参考文献

[1]岳梅.电网中无功功率补偿[J].宁夏电力,2006(5):12- 15,47.

YUE Mei. Reactive Power Compensation of Electric Network [J]. Ningxia Electric Power ,2006,(5) :12- 15,47.

[2]张勇军,任震,廖美英,等. 10 kV长线路杆上无功优化补偿[J].华南

理工大学学报,自然科学版,2001,29(4) 22- 25.

ZHANG Yong-jun, Ren Zhen, LIAO Mei-ying, LI Ben-he. Optimal Reactive Compensation on Tower of 10kV Long Distribution Feeder [J]. Journal of South China University of Technology,2001,29(4) 22- 25.

[3]范舜,韩水.配电网无功优化及无功补偿装置[M].北京:中国电力出版社,2003.

[4]王鑫国.10kV配电网无功功率平衡及优化补偿[J].农村电气化,2001,(3) 24- 25.

WANG Xin-guo Reactive Balance and Reactive Compensation of 10kV Distribution Network[J]. Rural Electrification,2001 (3) 24- 25. 2003.

[5]王伟,倪晶.城市配电网的无功功率补偿浅析[J].科技资讯,2006,(27).

WANG Wei,NI Jing Brief Analysis Reactive Compensation of Urban Distribution Network[J]. Science and Technology Information,2006,(27).

[6]李林川,刘艺光等.配电网无功补偿的实用算法[J].西北电力技术,1993,4(8) 56- 58.

LI Lin-chuan,LIU Yi-guang The Utility Method of Reactive Compensation in Distribution Network [J].Northwest China Electric Power, 1993,4 (8) : 56- 58.

[7]矫志宏,蔡中琴,郭志中.辐射型配电网无功补偿的精确矩法[J].继电器,2002,30(9) :11- 14.

JIAO Zhi-hong,CAI Zhong-qin ,GUO Zhi-zhong Accurate moment method for optimization of capacitors in radial distribution systems [J]. Relay, 2002,30(9) :11- 14.

作者简介

轧超(1964-),女,汉族,硕士,副教授,从事无功优化的研究。

Email :yc308@tjuci.edu.cn

李林川(1948-),男,汉族,硕士,教授,从事电力系统优化的研究。

Email :lilinchuan@tju.edu.cn

收稿日期 2008- 11- 15

(田春雨 编发)