

## 一种椭圆球面波调制信号自适应峰均比抑制方法

王红星 陆发平\* 刘传辉 刘 晓  
(海军航空工程学院电子信息工程系 烟台 264001)  
(山东省信号与信息处理重点实验室 烟台 264001)

**摘要:** 该文针对椭圆球面波(Prolate Spheroidal Wave Function, PSWF)时域正交调制信号峰均功率比过高, 易受功率放大器非线性影响, 造成信号失真, 导致系统解调性能下降的问题, 提出一种基于  $\mu$  律压缩的自适应峰均比抑制方法。该方法能够根据输入信号自适应调节压缩参数, 有效压缩信号峰值, 降低 PSWF 调制信号峰均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR), 同时保证压缩前后信号平均功率不变。理论论证和仿真结果表明, 该方法能够有效抑制 PSWF 调制信号 PAPR, 当压缩参数  $\mu$  为 1 且互补累计分布函数 CCDF 为  $10^{-4}$  时, 压缩后调制信号与原调制信号相比 PAPR 降低约 2.1 dB; 有效改善经过功放后调制信号功率谱和系统在高斯白噪声信道下的误码性能。

**关键词:** 椭圆球面波; 峰均功率比; 压扩算法; 输入功率回退

**中图分类号:** TN911.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2017)01-0075-07

**DOI:** 10.11999/JEIT160139

## Adaptive Peak-to-average Power Ratio Reduction Method for Prolate Spheroidal Wave Function Orthogonal Modulation Signal

WANG Hongxing LU Faping LIU Chuanhui LIU Xiao  
(Department of Electrical and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)  
(Key Laboratory on Signal & Information Processing of Shandong Province, Yantai 264001, China)

**Abstract:** A new companding transform based on  $\mu$ -law companding schemes is proposed for the reduction of Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) of Prolate Spheroidal Wave Function (PSWF) orthogonal modulation signal, which causes serious degradation in performance when a nonlinear Power Amplifier (PA) is used. According to the input signal, the method adjusts the compression parameters automatically, which can guarantee the average signal power constant before and after compression, compression signal peak. Both the mathematical deduction and simulation results show that the proposed method can effectively reduce PAPR of PSWF orthogonal modulation signal, and effectively improve the power spectrum density of the signal and the BER performance of system under AWGN channel. The PAPR of compressed modulation signal decrease about 2.1 dB in comparison to the original modulation signal, when the parameter  $\mu=1$  and Complementary Cumulative Distribution Function CCDF= $10^{-4}$ .

**Key words:** Prolate Spheroidal Wave Function (PSWF); Peak-to-Average Power Ratio (PAPR); Companding transform; Input back off

### 1 引言

椭圆球面波函数(PSWF)是 Bell 实验室 Slepian 和 Pollak 于 1961 年定义的一类特殊函数的集合<sup>[1]</sup>, 在通信工程<sup>[2]</sup>、流体力学<sup>[3]</sup>等领域得到广泛应用,

文献[4]结合 PSWF 脉冲双正交特性、频谱可控性以及时域和频域都具有最佳能量聚集性等优良特性, 提出了一种基于 PSWF 的非正弦时域正交调制方法, 采用时域波形叠加、频域频谱交叠的方式提高频带利用率, 使其频带利用率可以快速逼近 2 Baud/Hz 的香农理论极限。但在卫星通信系统中, 由于 PSWF 调制信号由多路脉冲叠加而成, 调制信号码元出现高峰值, 信号 PAPR 较高, 易受功率放大器 PA 非线性特性影响, 造成信号非线性失真, 导致发射信号严重的带内失真和带外干扰, 从而降低系统性能。因此, PAPR 问题成为制约 PSWF 在

收稿日期: 2016-01-29; 改回日期: 2016-06-29; 网络出版: 2016-09-08

\*通信作者: 陆发平 lufaping@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(60772056), 山东省“泰山学者”建设工程专项经费基金(ts20081130)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60772056), The “Taishan Scholar” Special Construction Funds Funded Project of Shandong Province (ts20081130)

卫星通信中应用的一个关键技术瓶颈, 研究 PAPR 的抑制方法, 能使基于 PSWF 的非正弦波通信成为卫星通信实用化技术, 提高频带利用率和数据传输速率, 对卫星通信系统整体性能改善具有重大意义。文献[5]从调制符号角度出发, 提出了一种基于调制符号选择的调制信号 PAPR 抑制方法, 但对调制信号的 PAPR 抑制能力有限, 且以损失系统频带利用率为代价; 文献[6]从正交 PSWF 脉冲集的特征向量加权表示入手, 提出了一种基于 Givens 旋转的 PAPR 抑制方法, 但算法复杂度较高; 在保证频带利用率的前提下, 寻求低复杂度、高效 PAPR 抑制方法成为基于 PSWF 脉冲的非正弦通信的研究重点。

$\mu$  律压缩是由 ITU-T CCITT G.711 定义的关于脉冲编码的一种压缩算法, 广泛应用于语音信号处理, 文献[7]首次将  $\mu$  律压缩应用于 OFDM 系统, 有效抑制了 OFDM 调制信号 PAPR。自此之后, 以  $\mu$  律压缩为基础, 针对 OFDM 调制信号的一系列改进算法被提出<sup>[8-12]</sup>, 但以  $\mu$  律压缩为基础的各种算法, 多根据实践经验对  $\mu$  律压缩参数进行改进优化, 未从理论层面对  $\mu$  律压缩参数对信号峰值和平均功率的影响进行理论推导。而从理论层面入手深入研究  $\mu$  律压缩参数对信号的影响机理, 对  $\mu$  律压缩适用性提升, 不同应用环境下参数优化以及最大限度提高系统性能具有指导性意义。同时, 现有以  $\mu$  律压缩为基础的压扩算法均针对基于正弦波的调制信号, 针对 PSWF 调制信号的 PAPR 压扩算法, 国内外未见这方面的研究报道。

本文在深入研究  $\mu$  律压缩参数对调制信号峰值和平均功率影响机理的基础上, 结合 PSWF 调制信号幅值特点, 提出了一种基于  $\mu$  律压缩的自适应峰均比抑制算法。根据输入信号, 自适应调节参数, 有效抑制了 PSWF 调制信号 PAPR, 保证压缩前后调制信号平均功率不变, 改善调制信号功率谱和系统误码性能。

## 2 基于 $\mu$ 律压缩的自适应峰均比抑制算法及算法实现模型

### 2.1 传统 $\mu$ 律压缩算法对 PSWF 调制信号影响

目前, 功放模型主要分为无记忆 PA 模型和有记忆 PA 模型两大类, 暂不考虑 PA 的记忆效应, 选用广泛应用于卫星通信系统中的 Saleh 模型<sup>[13]</sup>。Saleh 模型是根据对行波管功率放大器 TWTA 的输入、输出数据进行统计分析后得到的, 其 AM-AM 和 AM-PM 特性分别为

$$A(r) = \frac{\alpha_a r}{1 + \beta_a r^2}, \quad \Phi(r) = \frac{\alpha_\psi r^2}{1 + \beta_\psi r^2} \quad (1)$$

式中,  $r$  为输入信号的幅度,  $\alpha_a, \beta_a, \alpha_\psi, \beta_\psi$  为功放模型参数。由式(1)可知, 随着输入信号幅值的增大, 信号非线性失真越来越严重。

PAPR 是衡量调制信号进入功放饱和区时, 受 PA 影响非线性失真程度的重要指标, 离散信号的 PAPR 定义为一个码元时间内信号的峰值功率与其平均功率的比值<sup>[14]</sup>, 即

$$\rho(x) = 10 \lg \left( \frac{|x|_p}{|x|_a} \right) \quad (2)$$

式中,  $|x|_p$  是信号峰值功率,  $|x|_a$  是信号平均功率。

功放输入回退(Input Back Off, IBO)<sup>[15]</sup>是衡量功放效率的重要指标, IBO 越小, 功放效率越高, 其定义为

$$\text{IBO} = 10 \lg \left( P_s / P_a \right) \quad (3)$$

式中,  $P_s$  为功放达到饱和时输入信号功率,  $P_a$  是输入信号平均功率。由式(3)可知, 当  $P_s$  一定时, 随着输入信号平均功率的增大, IBO 不断降低, 功放效率越来越高; 但由式(1)可知, 功放对调制信号的非线性影响也越来越大。

$\mu$  律压缩是由 ITU-T 定义的关于脉冲编码的一种压缩算法, 其表达式为

$$y(n) = \frac{A \ln \left( 1 + \mu \frac{|x(n)|}{A} \right)}{\ln(1 + \mu)} \cdot \text{sgn}(x(n)), \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

式中,  $\text{sgn}(\cdot)$  为符号函数,  $x(n)$  和  $y(n)$  分别为输入电压和输出电压,  $A$  为输入电压的最大值。 $\mu$  律压缩算法复杂度低、抑制 PSWF 调制信号 PAPR 效果明显, 但是以增加信号平均功率为代价的, 且无法降低信号峰值; 文献[8]提出了一种简单的改进算法, 令式(4)中的  $A = E(x^2)$ , 能够有效降低信号峰值, 但存在压缩后 PSWF 调制信号平均功率过低、功放效率低的问题, 其他几种基于  $\mu$  律压缩的 PAPR 抑制算法<sup>[9-12]</sup>, 同样存在难以在保持压缩前后信号平均功率不变的前提下, 降低信号峰值的问题。本文针对现有基于  $\mu$  律压缩的 PAPR 抑制算法, 应用于 PSWF 调制信号存在的问题。首先, 深入分析  $\mu$  律压缩参数  $A, \mu$  对信号峰值和平均功率的影响机理, 对压缩参数进行优化, 实现对信号峰值的压缩。其次, 设计可调增益  $K(\mu, s)$ ,  $K(\mu, s)$  根据输入信号自适应调节, 保证压缩前后调制信号平均功率不变, 在此基础上, 提出基于  $\mu$  律压缩的自适应峰均比抑制算法, 并构建算法实现模型。

### 2.2 压缩参数 $A, \mu$ 对信号峰值和平均功率的影响

首先, 对压缩参数  $A, \mu$  对信号峰值的影响机理进行研究, 令式(4)中  $y = \max |y(n)|$ ,  $x = \max |x(n)|$ ,

将  $y$  对参数  $A$  求导，化简得

$$\frac{\partial y}{\partial A} = \frac{\ln(1 + \mu x/A) - \frac{\mu x/A}{1 + \mu x/A}}{\ln(1 + \mu)} \quad (5)$$

式中， $x > 0$ ， $\mu > 0$ ， $A > 0$ ，因此  $\partial y / \partial A > 0$ 。

其次，对参数  $A$ ， $\mu$  对信号平均功率的影响机理进行研究，由式(4)可知，压缩后 PSWF 调制信号的平均功率  $P$  对参数  $A$  的导数为

$$\frac{\partial P}{\partial A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{2A \ln(1 + (\mu |x(n)|)/A)}{(\ln(1 + \mu))^2} \cdot \left[ \ln(1 + (\mu |x(n)|)/A) - \frac{(\mu |x(n)|)/A}{1 + (\mu |x(n)|)/A} \right] \quad (6)$$

由式(5)与式(6)可知，当  $\mu > 0$ ， $A > 0$  时， $\partial P / \partial A > 0$ ，这表明在参数  $\mu$  一定的情况下，随着参数  $A$  的增加，压缩后调制信号的平均功率越来越大。

在不划分子频带的情况下，时间带宽积  $c = 4 \text{ Hz} \cdot \text{s}$ ，频率范围为  $[17.5, 22.5] \text{ GHz}$ ，取能量聚集性较高的前四阶 PSWF 脉冲叠加产生调制信号，并对幅值进行归一化， $\mu$  律压缩前后 PSWF 调制信号峰值、平均功率随参数  $A$ ， $\mu$  的变化曲线如图 1 所示。从图 1(a)中可知，随着参数  $A$  的增加，压缩后信号峰值越来越大，当  $A < \max(|x|)$  时，压缩后调制信号峰值小于压缩前，且  $\mu$  值越小压缩后调制的峰值越大；当  $A > \max(|x|)$  时，压缩后调制信号峰值大于压缩前，且  $\mu$  值越小压缩后调制的峰值越小。

从图 1(b)可知，随着参数  $A$  的增加，压缩后调制信号平均功率越来越大，当  $A$  值较小时，压缩后调制信号的平均功率小于压缩前，且  $\mu$  值越小压缩后调制信号平均功率越大；当  $A$  值较大时，压缩后调制信号的平均功率大于压缩前，且  $\mu$  值越小压缩后调制信号平均功率越小。

### 2.3 自适应压扩算法及算法实现模型构建

通过 2.2 节分析可知，要实现对调制信号大幅值分量的压缩，有效抑制调制信号 PAPR，需要较小的  $A$  值与较大的  $\mu$  值，但当参数  $A$  取值较小时，压缩后调制信号的平均功率较小、IBO 较大，存在 PA 效率较低的问题。

针对上述问题，考虑到对调制信号进行线性增益前后调制信号 PAPR 不变，因此，对压缩后调制信号进行线性增益，保证压缩前后信号的平均功率不变；同时，由式(4)可知，压缩后信号平均功率随着压缩参数、调制信号的变化而不断变化，因此，增益需要根据压缩参数、输入信号的变化而变换，才能保证压缩前后信号的平均功率不变。

通过上述分析，在式(4)的基础上添加可调增益  $K(\mu, s)$ ，令  $K^2(\mu, s)$  等于压缩前后调制信号平均功率

的比值，即

$$K^2(\mu, s) = P_{bf}/P_{af} = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{|x(n)|^2 (\ln(1 + \mu))^2}{\left( A \ln(1 + (\mu |x(n)|)/A) \right)^2} \quad (7)$$

式中， $P_{bf}$  为压缩前信号平均功率， $P_{af}$  为压缩后信号平均功率，在式(7)自适应准则下， $K(\mu, s)$  根据压缩参数、输入信号自适应调节，保证压缩前后信号平均功率不变。

基于上述分析，对传统  $\mu$  律压缩进行改进，提出了一种基于  $\mu$  律压缩的自适应峰均比抑制算法，简称自适应压扩算法，其表达式为

$$y(n) = K(\mu, s) \cdot \frac{A \cdot \ln(1 + \mu |x(n)|/A)}{\ln(1 + \mu)} \text{sgn}(x(n)), \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (8)$$

同时，根据 PSWF 调制信号的幅值分布特点，结合 2.2 节压缩参数  $A$  对信号峰值的影响机理，对式(8)参数  $A$  取值进行优化，令参数  $A$  等于调制信号绝对值均值  $E(|x|)$ ，即

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} |x(n)| \quad (9)$$

压缩参数  $A$  按式(9)，根据不同的输入信号自适应调节，由数理统计相关知识可知，参数  $A < \max(|x|)$ ，因此，能够有效压缩调制信号峰值，抑制调制信号 PAPR。式(8)对应的解压表达式为

$$x(n) = \frac{A}{\mu} \left[ \exp \left\{ \frac{y(n)}{K(\mu, s)A} \cdot \ln(1 + \mu) \right\} \cdot \text{sgn}(y(n)) \right] - 1, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (10)$$

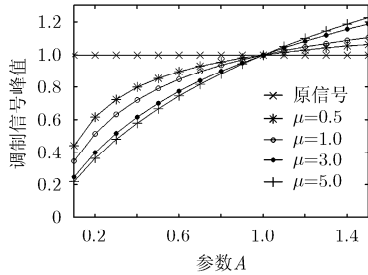
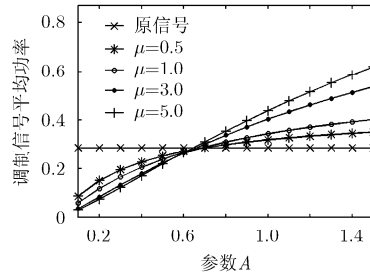
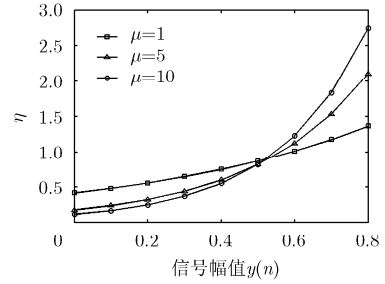
在完成了对自适应压扩算法的提出后，下面对算法实现模型进行构建。在接收端，按传统思路需要根据式(10)对信号进行解压，恢复压缩前 PSWF 调制信号。然而，PSWF 调制信号的解调完全依赖于脉冲组间良好的正交性，对于引入噪声的压缩 PSWF 调制信号，在接收端进行解压时，对调制信号的影响，在所阅读国内外文献中未有相关研究报告。

假设压缩后的信号  $y(n)$  ( $y(n) \geq 0$ ) 产生  $\Delta y(n)$  ( $\Delta y(n) \geq 0$ ) 的扰动，按式(10)对其进行解压，定义解压前后调制信号误差比值为

$$\eta = \Delta x(n) / \Delta y(n) \quad (11)$$

式中， $\Delta x(n)$  为解压后调制信号误差。

所用 PSWF 调制信号与图 1 相同， $\eta$  随  $\mu$ ， $y(n)$  的变化曲线如图 2 所示，从图中可知，对大幅值信号进行解压时，扰动  $\Delta y(n)$  被放大，导致 PSWF 脉冲间良好的正交性遭到破坏，严重降低系统的解调性能。

(a) 信号峰值随参数 A,  $\mu$  的变化曲线(b) 信号平均功率随参数 A,  $\mu$  的变化曲线图 1 压缩后信号峰值和平均功率随参数 A,  $\mu$  的变化曲线图 2  $\eta$  随  $\mu$ ,  $y(n)$  的变化曲线

通过上述分析可知,在接收端对信号进行解压,会进一步扩大噪声的影响,降低信噪比,恶化系统解调性能,因此在接收端直接对压缩 PSWF 调制信号进行解调。基于上述思路,构建自适应压扩算法实现模型,模型由  $E(|x|)$  计算模块、信号压缩模块、可调增益计算模块、乘法运算模块组成,如图 3 所示。主要步骤如下:

(1)在发射端,首先,  $E(|x|)$  计算模块按式(9),根据输入信号,计算输入调制信号绝对值均值的  $E(|x|)$ ,自适应调节参数 A,实现对信号峰值的压缩,抑制信号 PAPR;

(2)获取参数 A 后,利用信号压缩模块,按式(4)对调制信号进行压缩处理,计算信号  $y_1(n)$ ;

(3)可调增益模块按式(7)增益  $K(\mu, s)$  的自适应准则,根据输入信号和压缩参数自适应调节  $K(\mu, s)$ ,保证压缩前后信号平均功率不变;

(4)最后,乘法运算模块将步骤(2)信号  $y_1(n)$  与步骤(3)可调增益  $K(\mu, s)$  相乘,计算自适应压扩算法的输出信号  $y(n)$ ;

(5)在接收端,对经过 PA 和信道的压缩 PSWF 调制信号,直接进行解调。

### 3 自适应压扩算法对调制信号 PAPR 与 PSWF 脉冲间正交性的影响

#### 3.1 算法对信号 PAPR 的影响

定义 PSWF 调制信号压缩前后 PAPR 的比值为  $\alpha$ , 即

$$\alpha = \rho(x)/\rho(y) = \sum_{i=1}^n \frac{|x|_{\max}^2 |\ln(1 + \mu'x(i))|^2}{|\ln(1 + \mu' |x|_{\max})|^2 |x(i)|^2} \quad (12)$$

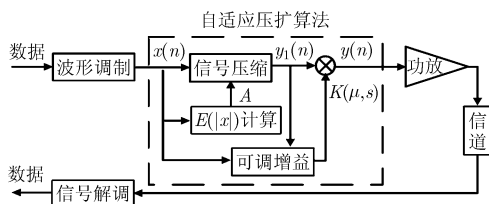


图 3 自适应压扩算法实现模型

式中,  $\mu' = \mu / E(|x|)$ ,  $E(|x|)$  与  $|x|_{\max}$  只与调制信号有关,脉冲参数设定后可以认为是常数。下面研究参数  $\mu$  对于 PSWF 调制信号 PAPR 的影响,令  $\alpha$  对参数  $\mu$  求导,利用 Taylor 公式化简得

$$\frac{d\alpha}{d\mu} \geq \sum_{i=1}^n \left\{ 2 \left[ \frac{\mu^2 |x|_{\max}}{E(|x|)} (2|x|_{\max} - |x(i)|) \right] \sqrt{\left[ \left( \mu^2 + \frac{\mu^3 |x|_{\max}}{E(|x|)} \right) \cdot \left[ \frac{2E(|x|)}{\mu |x|_{\max}} + |x(i)| \right]^3 \right]} \cdot \left[ \ln \left( 1 + \frac{\mu |x|_{\max}}{E(|x|)} \right) \right]^3 \right\} \quad (13)$$

由式(13)可知,  $d\alpha/d\mu > 0$ , 这表明随着参数  $\mu$  的增加,  $\alpha$  越来越大,自适应压扩算法对调制信号 PAPR 的抑制能力越来越强。

#### 3.2 算法对 PSWF 脉冲间正交性的影响

目前,对 PSWF 调制信号的解调主要采用相干解调,PSWF 脉冲组间良好的正交性是调制信号正确解调的关键,而自适应压扩算法是一种非线性运算,因此会对 PSWF 脉冲间良好的正交性造成一定的破坏,影响系统解调性能。根据式(4),利用 Taylor 公式对压缩后调制信号化简,得

$$s'(t) = \text{sgn}(s(t)) \cdot \frac{2K(\mu, s)E(|s(t)|)}{\ln(1 + \mu)} \cdot \left[ \frac{|s(t)|}{2E(|s(t)|)} + o(s^3(t)) \right] \quad (14)$$

由式(14)可知,当  $2E(|s(t)|)/\mu \gg |s(t)|$ , 即参数  $\mu$  较小时:

$$s'(t) \approx \frac{\mu K(\mu, s)}{\ln(1 + \mu)} \cdot s(t) \quad (15)$$

当  $2E(|s(t)|)/\mu \ll |s(t)|$ , 即参数  $\mu$  较大时:

$$s'(t) \approx \frac{2K(\mu, s)E(|s(t)|)}{\ln(1 + \mu)} \cdot \text{sgn}(s(t)) \quad (16)$$

从式(15)与式(16)可知,当参数  $\mu$  较小时,压缩

前后信号基本呈现线性关系，自适应压扩算法对 PSWF 脉冲间正交性影响较小；当参数  $\mu$  较大时，压缩前后信号呈现非线性关系，严重破坏 PSWF 脉冲间良好的正交性，将严重影响 PSWF 调制信号的正常解调。因此，在自适应压扩算法的实际应用中，考虑适当牺牲算法的 PAPR 抑制能力，选用较小的参数  $\mu$  对信号进行处理，对 PSWF 脉冲间正交性影响较小，能够保证系统正常的解调性能，从理论层面说明第 2.3 节算法实现模型的合理性。

### 4 仿真分析

在 Matlab 仿真环境下，对提出的自适应压扩算法进行仿真验证，为更好地分析算法对 PSWF 调制信号正交性和功率谱的影响，仿真时将频带划分为多个子波带。

#### 4.1 仿真条件

(1)调制信号：频带 1~1.1 MHz，划分为 4 个子波带，频谱交叠度为 50%，时间带宽积  $c = 4 \text{ Hz} \cdot \text{s}$ ，每个子波带按能量聚集性由高到低，取前二阶 PSWF 脉冲，叠加生成非正弦时域正交调制信号，并对调制信号幅值进行归一化处理。

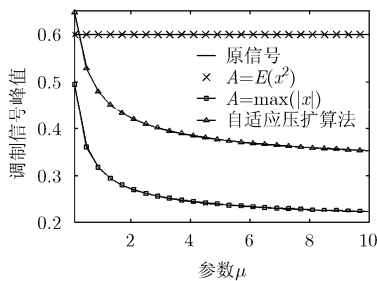
(2)功率放大器：选用 Saleh 模型，其 AM-AM 和 AM-PM 特性分别为式(1)所示，式中，参数取经典值  $\alpha_a = 2, \beta_a = 1, \alpha_\psi = \pi/3, \beta_\psi = 1$  [13]。

### 4.2 仿真结果与分析

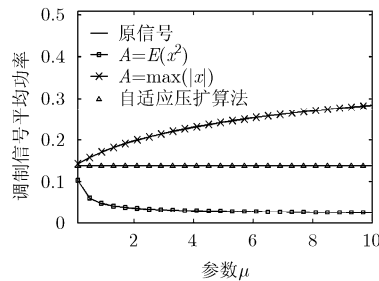
**4.2.1 信号峰值和平均功率** 图 4(a)是 PSWF 调制信号压缩前后峰值随  $\mu$  的变化曲线，从图中可知，自适应压扩算法能够有效压缩调制信号峰值，且随着  $\mu$  值的增加，对调制信号峰值的抑制能力越来越大，与理论分析一致。同时，当  $\mu > 0.4$  时，自适应压扩算法对信号峰值的压缩能力优于式(4)中参数  $A = \max(|x|)$  的情况，低于式(4)中参数  $A = E(x^2)$  的情况。这表明提出的自适应压扩算法，能够有效解决  $A = \max(|x|)$  时，压缩前后峰值不变的问题，实现对峰值信号的压缩。

图 4(b)是 PSWF 调制信号压缩前后平均功率随  $\mu$  的变化曲线，从图中可知，调制信号经过自适应压扩算法压缩前后信号平均功率相同，保证压缩前后功放 IBO 不变，PA 有较高的功放效率。

**4.2.2 调制信号功率谱** 图 5 是 PSWF 调制信号压缩后经过 PA 前后归一化功率谱，从图 5(a)中可知，自适应压扩算法使信号频谱发生了扩展，带外失真达到了约 20 dB，且随着参数  $\mu$  的增加，失真越来越严重。但从图 5(b)中可知，调制信号压缩后通过 PA，较直接经过 PA 的功放失真信号，带外失真降低了约 5 dB。这表明由于自适应压扩算法是一种非线性算法，导致调制信号有一定程度的失真，但算法能够有效抑制调制信号 PAPR，在一定程度上抑制 PA 对信号的非线性影响，改善调制信号频谱。

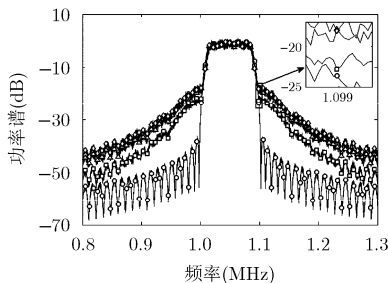


(a)压缩后信号峰值随  $\mu$  变化曲线

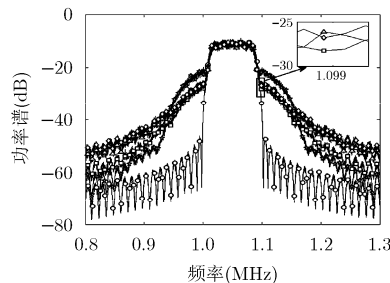


(b)压缩后信号平均功率随  $\mu$  变化曲线

图 4 压缩后信号峰值和平均功率随  $\mu$  变化曲线



(a)压缩前后调制信号功率谱



(b)调制信号经过 PA 后功率谱

图 5 调制信号功率谱

**4.2.3 不同参数  $\mu$  的 PAPR 抑制特性** 互补累积分布函数(Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF)定义为信号 PAPR 超过某一门限的概率,用来衡量调制信号 PAPR 统计特性。图 6 是自适应压扩算法在不同参数  $\mu$  时,压缩前后调制信号 CCDF 曲线,从图中可知,本文提出的自适应压扩算法能够有效抑制调制信号 PAPR,当  $\mu = 1$ , CCDF =  $10^{-4}$  时,经过自适应压扩算法压缩前后,PSWF 调制信号 PAPR 分别为 8 dB 和 5.9 dB,与原调制信号相比,压缩后调制信号 PAPR 降低约 2.1 dB;同时,随着参数  $\mu$  的增加,抑制 PAPR 的能力越来越强,与第 3 节理论分析一致,这表明提出的自适应压扩算法是一种高效 PAPR 抑制方法。

**4.2.4 系统误码性能** 图 7 是解调方式采用相关解调的条件下,采用自适应压扩算法前后,系统误比特率性能仿真曲线。从图中可知,本文提出的算法能够一定程度上降低 PA 造成的信号带内失真,当参数  $\mu = 1$ ,误比特率为 BER =  $10^{-3}$  时,较直接经过 PA 的功放失真信号性能提高约 2.5 dB。同时,从图中可知,随着参数  $\mu$  的增加,本文提出的自适应压扩算法降低带内失真的能力先升高后降低,当参数  $\mu$  较小时,抑制信号 PAPR 的能力较小,信号受

PA 非线性影响大。当参数  $\mu$  较大时,抑制信号 PAPR 的能力增强,但对 PSWF 脉冲间正交性破坏严重,降低系统解调性能,与第 3 节理论分析一致。

## 5 结束语

本文针对 PSWF 调制信号 PAPR 较高,易受 PA 非线性影响的问题,结合  $\mu$  律压缩,提出了一种适用于 PSWF 调制信号的自适应峰均比抑制方法,并分析了算法的 PAPR 抑制能力。同时,通过理论推导  $\mu$  律压缩参数对调制信号峰值和平均功率等指标的影响机理,为基于  $\mu$  律压缩的峰均比抑制方法适用性提升、参数优化提供了理论指导,且本文算法同样适用于 OFDM 系统、语音信号处理。理论推导和仿真结果表明:本文算法在保证压缩前后信号平均功率不变的前提下,能够有效抑制调制信号 PAPR,改善信号功率谱和系统解调性能,有较高的功放效率。但是,当参数  $\mu = 1$ 、误比特率为  $10^{-4}$  时系统误码性能较原调制信号还有约 0.5 dB 的差距,表明单纯通过抑制信号 PAPR 的方式,降低 PA 非线性影响能力是有限的。如何将 PAPR 抑制技术与预失真方法结合使用,进一步降低 PA 对调制信号非线性影响,将是我们的后续工作的关注重点。

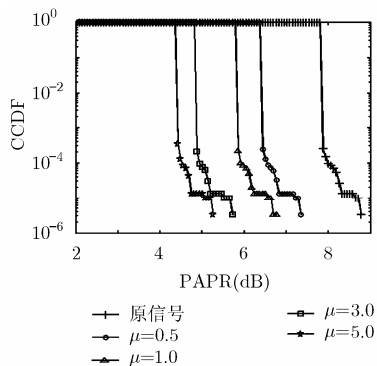


图 6 不同参数  $\mu$  的 PAPR 抑制特性曲线

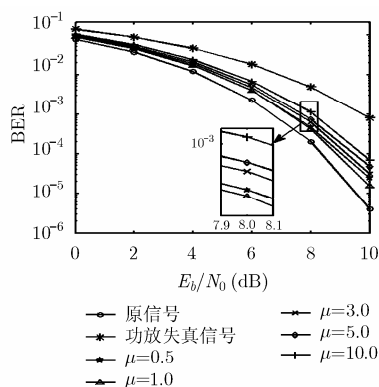


图 7 系统误码率性能比较

## 参考文献

- [1] FLAMMER C. Spheroidal Wave Functions[M]. California: Stanford University Press, 1956: 16-19.
- [2] 赵志勇, 王红星, 刘锡国, 等. 正交椭圆球面波函数脉冲调制方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(10): 2331-2335. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00384.  
ZHAO Z Y, WANG H X, LIU X G, et al. Orthogonal prolate spheroidal wave functions modulation method[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(10): 2331-2335. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00384.
- [3] OSIPOVE A and ROKHLIN V. On the evaluation of prolate spheroidal wave functions and associated quadrature rules[J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2014, 36(1): 108-142. doi:10.1016/j.acha.2013.04.002.
- [4] 王红星, 赵志勇, 刘锡国, 等. 非正弦时域正交调制方法[P]. 中国专利, ZL200810159238.3, 2011-02-02.  
WANG H X, ZHAO Z Y, LIU X G, et al. The nonsinusoidal orthogonal modulation in time domain[P]. China Patent, ZL2008159238.3, 2011-02-02.
- [5] 舒根春, 王红星. 降低基于 PSWF 的非正弦调制信号 PAR 方法[J]. 信息传输与接入技术, 2011, 37(1): 22-24.

- SHU G C and WANG H X. Method of reducing PAR of non-sinusoidal modulated signals based on PSWF[J]. *Radio Communications Technology*, 2011, 37(1): 22–24.
- [6] 陈昭男, 王红星, 钟佩琳, 等. 基于 Givens 旋转变换的 PSWF 调制信号 PAPR 抑制方法[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(6): 1406–1412. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01221.
- CHEN Z N, WANG H X, ZHONG P L, *et al.* The PAPR reduction method for PSWF based on givens rotation transformation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(6): 1406–1412. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01221.
- [7] WANG X B, TJHUNG T, and NG C S. Reduction of peak-to-average power ratio of OFDM system using a companding technique[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 1999, 45(3): 303–307. doi: 10.1109/11.796272.
- [8] HUANG X, LU J, ZHENG J L, *et al.* Reduction of peak-to-average power ratio of OFDM signals with using companding transform[J]. *Electronics Letters*, 2001, 37(8): 506–507. doi: 10.1049/el:20010345.
- [9] SAKRAN H, SHOKAIR M, and ELAXM A. A new peak-to-average power reduction technique in the OFDM system using  $\mu$ -law compander[C]. *IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Regkjavik, Iceland, 2008: 386–390. doi: 10.1109/ISWC.S.2008.4726083.
- [10] HASHIM S J, ABAS A F, VARAHRAM P, *et al.* Reduction of peak to average power ratio in coherent optical orthogonal frequency division multiplexing using companding transform[C]. *Region 10 Symposium*, Kuala Lumpur, Malaysian, 2014: 177–180. doi: 10.1109/TENCONSpring.2014.6863020.
- [11] ANJALIAH C, PRASAD P, and KTISHNA H. Mu-law companded PTS for PAPR reduction in OFDM systems[C]. *IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, Coimbatore, India, 2015: 1–4. doi: 10.1109/ICECCT.2015.7226139.
- [12] CHANDRASEKHAR R, KAMARAJU M, SAIRAM M V S, *et al.* PAPR reduction using combination of precoding with Mu-law companding technique for MIMO-OFDM systems[C]. *IEEE International Conference on Communications and Signal Processing*, Melmaruvathur, India, 2015: 0479–0483. doi: 10.1109/ICCSP.2015.7322430.
- [13] SALEH A A M. Frequency-independent and frequency-dependent nonlinear models of TWT amplifiers[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1981, 29(11): 1715–1720. doi: 10.1109/TCOM.1981.1094911.
- [14] 杨超, 王勇, 葛建华. 联合迭代滤波与压扩参数优化的 OFDM 信号峰平比抑制[J]. *通信学报*, 2015, 36(4): 2515–2520. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01820.
- YANG C, WANG Y, and GE J H. Companding transform technique combined with iterative filtering for reducing PAPR of OFDM signals[J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(4): 2515–2520. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01820.
- [15] JIANG T and WU Y Y. An overview: peak-to-average power ratio reduction techniques for OFDM signals [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2011, 54(2): 257–268. doi: 10.1109/TBC.2008.915770.
- 王红星: 男, 1962 年生, 教授, 研究方向为现代通信系统、非正弦波通信、无线光通信.
- 陆发平: 男, 1991 年生, 硕士生, 研究方向为现代通信系统、非正弦波通信.
- 刘传辉: 男, 1984 年生, 讲师, 研究方向为现代通信新技术、非正弦波通信.
- 刘 晓: 男, 1990 年生, 博士生, 研究方向为现代通信新技术、非正弦波通信.