

新的低复杂度降低 OFDM 信号峰均功率比的压缩扩张技术

江 涛

(华中科技大学电子与信息工程系, 武汉 430074)

摘 要: 本文提出了一种新的降低 OFDM 信号峰均功率比的压缩扩张技术. 文中通过与传统压缩扩张技术的对比, 详细介绍了新压缩扩张技术的方法和计算复杂度, 并从统计角度分析了对峰均功率比及其用于 OFDM 系统时对系统误比特率的改善等方面的性能. 数值仿真说明, 与传统压缩扩张技术相比较, 新压缩扩张技术不仅具有更低的计算复杂度, 而且可以获得更为高效的性能增益.

关键词: 低复杂度; 压缩扩张技术; 正交频分复用; 峰均功率比

中图分类号: TN915.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)07-1218-04

New and Low Complexity Companding Technique for Reducing Peak-to-Average Power Ratio of OFDM Signals

JIANG Tao

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: A new companding scheme is proposed to reduce the Peak to Average Power Ratio (PAPR) of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) signals. The characteristics and performance of system with conventional and new companding scheme are compared. The proposed scheme is illustrated in detail and analyzed in terms of reducing PAPR, computational complexity and improvement in BER performance in OFDM system. Our simulation results confirm that the suggested scheme exhibits a good ability to reduce PAPR and can outperform with lower computational complexity than conventional companding scheme substantially.

Key words: lower complexity; companding transform; OFDM; PAPR

1 引言

正交频分复用(OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing)是一种频谱利用率很高的多载波调制技术, 具有良好的抗多径衰落能力, 并可以实现数据的高速传送. 近些年来已被广泛应用到无线通信的很多领域中. 在未来的第四代移动通信系统研究中, OFDM 技术也是被十分看好的一种候选方案. 但是, 由于 OFDM 信号各子载波的包络值统计独立, 叠加后信号的峰均功率比(PAPR: Peak to Average Power Ratio)将随着子载波数的增加而增加. 研究表明并根据中心极限理论, 叠加后信号波形的幅值服从高斯分布, 因而 PAPR 很高. 这就要求系统的功率放大器(HPA: High Power Amplifier)具有高的线性动态范围, 以避免传输信号的频谱扩散和非线性失真, 同时要求后继的 D/A 转换器具有较大的转换宽度, 增加了系统实现的成本和复杂度. 为了解决这个问题, 人们提出了许多降低 PAPR 的方法, 常用的方法可以分为两类. 一类方法是降低产生较大幅值信号的概率, 例如分组编码方法^[1], 其降低 PAPR

的效果非常好, 但主要问题是编码效率低, 特别是对子载波数量较大的系统不是很有效. 文献[2]提出了部分传输序列的方法, 虽然降低 PAPR 效果比较好, 但系统实现的复杂度较高, 而且由于需要传输边带消息, 从而降低了系统的带宽利用率, 这两者都极大地限制了它在无线蜂窝网络中的实际应用. 第二类方法是对 OFDM 信号进行直接的处理(包括幅度和相位)以达到降低 PAPR 的目的. 最简单的方法是剪波法^[3], 但它会给系统引入新的噪声, 并且对频谱特性的影响较大, 使得带外扩散和带内失真严重, 并影响相邻信道的信号.

文献[4]提出了一种基于 μ 律的压缩扩张技术来(文中称为传统压缩扩张技术)降低 PAPR. 这种方法实现简单, 降低 PAPR 的效果也比较好. 但是其主要思想是对小幅值信号进行放大, 而保持大幅值信号不变, 这样是以增大整个系统的平均功率为代价来达到降低 PAPR 的目的^[5], 因而其效果非常有限, 而且也仅仅只考虑到了量化噪声的影响而忽略了 HPA 的影响^[4,6]. 量化噪声相对于 HPA 而言, 其影响是可以忽略不计的.

本文提出了一种新压缩扩张技术. 新压缩扩张技术不需进行任何参数的优选, 计算复杂度更低. 传统压缩扩张技术压缩后的信号呈现的是一种非均匀分布, 而新压缩扩张技术压缩后的信号将呈现一种幅值围绕平均幅值的似均匀分布, 不仅降低了大幅值信号的功率, 同时增大了小幅值信号的功率, 从而增强了小幅值信号的抗噪声能力, 可以获得更为高效的性能增益.

2 峰均功率比的分析

假设 OFDM 系统是由 N 个子载波组成, 第 k 个 OFDM 符号块中第 n 个子载波所传输的信息码元为 $d_{n,t}$, 那么 OFDM 信号的复包络可表示为:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{N-1} d_{n,t} e^{2\pi u t / N} \quad (1)$$

这样, OFDM 信号的 PAPR 就可以定义为:

$$\text{PAPR} = 10 \log \left[\frac{\max |s(t)|^2}{E\{|s(t)|^2\}} \right] \text{ (dB)} \quad (2)$$

但是, 考虑到服务质量中的功率控制策略, 传统测量 PAPR 的方法在某些情况下并不实用, 在 OFDM 系统中应用统计特性将具有更重要的现实意义, 从统计角度给出的互补累积分布函数 (CCDF: Complementary Cumulative Distribution Function) 曲线将更加直观和切合实际.

降低 PAPR 的主要目的就是为最大限度地降低非线性 HPA 对 OFDM 信号的影响. 为了减少这种影响, 必须在信号到达 HPA 之前对信号进行适当的预失真处理. 因此, 评价其效果的好坏必须与 HPA 结合起来考虑才能确切地反映出算法的优劣. HPA 主要有两种类型: SSPA (Solid State Power Amplifier) 和 TWTA (Traveling Wave Tube Amplifier). SSPA 多用于蜂窝移动通信系统的研究, 其转换函数为:

$$R(t) = \frac{r(t)}{(1 + (r(t))^{2p})^{1/2p}} \quad (3)$$

$$\phi(t) = \varphi(r(t)) \quad (4)$$

图 1 中给出了不同 p 值条件下 HPA 的输出-输入示意图. 如果信号在被送到 HPA 之前, 就对信号进行一定的预处理, 将信号的峰值控制在 HPA 的饱和区之内, 那么信号在通过 HPA 时就不会有较大的失真, 从而达到在不降低系统性能的同时尽可能地降低 PAPR 值.

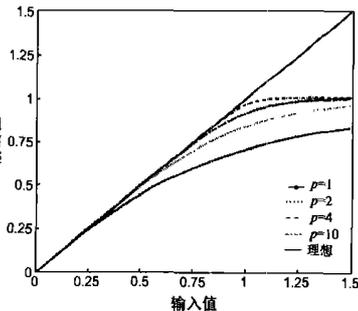


图 1 HPA 的输入-输出关系

3 新压缩扩张技术的设计与分析

压缩扩张变换一般都是在通信系统的发射端, 利用压缩扩张变换模块对小幅值信号进行幅值增大, 同时对大幅值信号进行幅值减小. 在接收端进行一个可逆过程.

我们知道, 未经压缩扩张的 OFDM 信号其实部和虚部都遵循均值为零、方差为 0.5 (实部和虚部各占整个信号功率的一半) 的高斯分布, 文献[4]和[7]都是据此来选择系统中压缩扩张器合理的压缩扩张曲线, 以保证系统误码率性能的情况下最大限度地降低信号的 PAPR 值. 但是这些压缩扩张技术都只能在一定程度上降低信号的 PAPR. 文献[7]中提出的方案使信号基本上都集中在一个很小的幅值范围内, 对信号造成的畸变比文献[4]的方案更为严重. 事实上, 一方面, 信号在进行压缩扩张后的幅值分布在理论上是无界的, 只要子载波数很大, 压缩扩张后信号的峰值仍然相当大; 另一方面, 压缩扩张后的幅值相对于可以达到的峰值来说几乎都集中在幅值较小的位置上, 这样就会使得 PAPR 仍然比较大. 具体分析可参见后面的图 3 和图 4. 而且传统压缩扩张技术仅仅考虑到了 D/A 转换时的量化噪声却没有考虑到 HPA 的非线性特性所造成的失真. 针对这些, 设想如果压缩扩张后信号的幅值能均匀地分布在一个有限的范围内, 那么, 信号的峰值也就会在一个有限的范围内了, 而且信号幅度比较分散以至于均值不会太小, 从而降低 PAPR 的性能会更好些. 这就是本文提出的新压缩扩张技术的出发点. 新压缩扩张技术使得经过压缩扩张处理之后的信号呈现一种似均匀分布, 这样使得小幅值信号和大幅值信号都具有相同的抗噪声能力, 同时给定一个调整功率水平因子 k , 可根据要求对信号进行动态的调整.

假设在发射端, 压缩扩张前后的 OFDM 信号分别为 $s(t)$ 和 $s_c(t)$, 则

$$s_c(t) = k * \text{erfc} \left[\frac{(s(t) - \mu)}{\sqrt{2}\sigma} \right] \quad (5)$$

式中 μ 为压缩扩张前信号的均值, σ^2 为压缩扩张前信号的方差, k 为调整功率水平因子, 为了对比系统性能的方便, 可调整 k 值以保持与未经压缩扩张处理的信号具有相同平均功率值.

同样在接收端假设压缩扩张前后的信号分别为 $r(t)$ 、 $r_c(t)$, 则

$$r_c(t) = \sqrt{2}\sigma * \text{erfc}^{-1} \left[\frac{r(t)}{k} \right] + \mu \quad (6)$$

如果我们假设信道的乘性和加性噪声分别为 $h(t)$ 和 $n(t)$, 那么

$$r(t) = h(t) * s'_c(t) + n(t) \quad (7)$$

其中, $s'_c(t)$ 为 $s_c(t)$ 经过 HPA 后的信号, $n(t)$ 为均值为零, 方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声.

下面通过与传统压缩扩张技术的对比, 分别从 PAPR 的原始定义和统计性质来说明新压缩扩张技术的一些特性.

如果 OFDM 原信号的均值为零, 方差为 1, 那么从文献[4]中知道, 经过传统压缩扩张之后 OFDM 信号的 PAPR 为

$$\text{PAPR} = 10 \log_{10}(N - 2) \quad (8)$$

但是经过新压缩扩张技术处理之后, 其 OFDM 信号的峰值与均值均只与 k 值有关, 但 PAPR 却为一个定值

$$\text{PAPR} = 10 \log_{10} \left[\frac{k^2}{k^2/3} \right] = 4.77 \text{ dB} \quad (9)$$

图 2 是两种压缩扩张技术输入信号和输出信号的对应关

系。可以看出,两种压缩扩张变换都是关于转折点呈奇对称,都可以保证信号的相位在变换前后保持不变。但是,新的压缩扩张技术由于无须进行合理参数的选择,实现起来更为简单,而且还保证经压缩扩张后信号的峰值位于非线性功率放大器的饱和区内而不超越,从而使得经过压缩扩张处理之后的信号在经过 HPA 时尽可能小的受到影响。

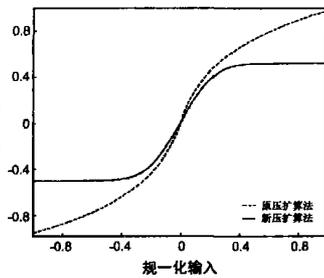


图2 压缩扩张技术输入-输出关系曲线

从统计角度来看,概率密度函数的分布能直观地反映出压缩扩张前后信号的分布规律。从图3可以看出:原始的 OFDM 信号呈现一种高斯分布,而经过传统压缩扩张处理后的信号虽然整体不再是一种高斯分布,但是局部仍是一种似高斯分布的规律。但经过新压缩扩张技术处理后的信号很明显地呈现一种似均匀分布的规律。这就说明经过新压缩扩张技术处理之后,小振幅信号的振幅被扩展,而对大振幅信号的振幅进行一定程度的压缩,这样,信号幅值就主要集中在平均幅值附近的范围中,因而小幅值信号的抗噪声能力也就增强了,同时也不会出现传统压缩扩张中小幅值信号相对而言扩大太严重的情况,从而不致于使信号出现严重失真。

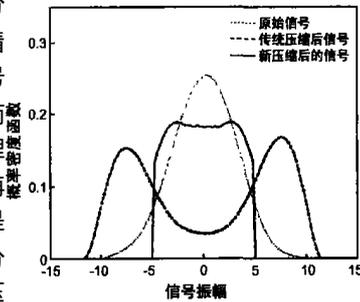


图3 概率密度函数分布比较

图4是OFDM信号处理前后的逆累加分布函数曲线图。从图中明显可以看出,传统压缩扩张技术保持了大幅值信号的出现概率仅仅增加了小幅值信号的出现概率,这样必然会增加系统的平均规律值。新压缩扩张技术结合了剪波法与传统压缩扩张技术两者的优点,既降低大幅值信号出现概率,同时增大小信号幅值出现概率,如需对平均功率进行控制则可以通过调整 K 值来控制。这样,新压缩扩张技术的效果必然优于剪波法和传统压缩扩张技术。

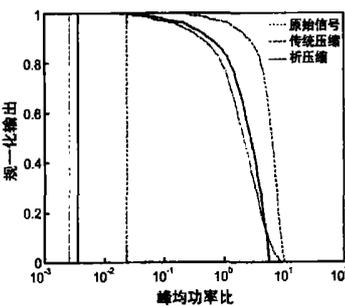


图4 互补累加分布函数的比较

同时我们也知道,因为 OFDM 信号存在着高的 PAPR, 从而使得它的频谱特性就象一个似正方形, 频谱的滚降速度非常快。如果要降低其 PAPR, 势必就会降低它的频谱滚降速度以至于产生旁瓣, 从而对邻近信道间产生干扰。图5是分别应

用传统压缩扩张和新压缩扩张技术对 OFDM 信号进行处理之后的频谱特性, 从图中我们可以明显地发现, 新压缩扩张变换技术对原始信号的频谱特性的改变是非常的小, 以至于它所引起的频谱再生长可以忽略不计, 但是传统压缩扩张变换后的 OFDM 信号的频谱在整体上有了一个急剧的上升。从这个角度分析, 新压缩扩张变换所取得的效果是非常的理想。

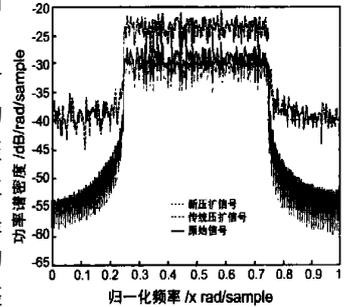


图5 OFDM 信号的频谱特性 ($N=64, L=4$)

4 仿真与性能分析

图6为系统的仿真流程。信源直接进行相关的调制, 在完成串并转换后被送到 IFFT 模块, 得到 OFDM 信号后经压缩扩张变换器处理后, 送入到后级 HPA 中, 接着由 RF 发射送到加性高斯白噪声 (AWGN) 信道中。接收信号经逆变换后被送到 FFT 模块进行相关的计算, 在完成并串转换后再进行解调就会得到所需要的比特流。



图6 OFDM 系统基带仿真系统框图

图7为信号经不同技术处理前后的波形。我们看到, 两种压缩扩张技术均不改变原信号相位, 仅对振幅进行操作。传统压缩扩张技术只对小幅值信号进行扩展而保持大幅值信号不变, 但新压缩扩张技术在对小幅值信号进行扩展的同时减弱大幅值信号。

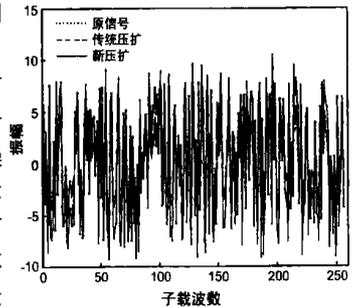


图7 OFDM 信号处理前后的波形

作为比较, 我们给出相同条件下应用不同技术所得到的 SNR-BER 性能曲线。计算机仿真流程如图6所示。仿真参数为: OFDM 基带仿真系统中每个子载波均采用 DQPSK 映射方式, 子载波数为 64, 选取过采样率为 4, 非线性 HPA 为 SSPA 模型且选取 $p=2$ 。

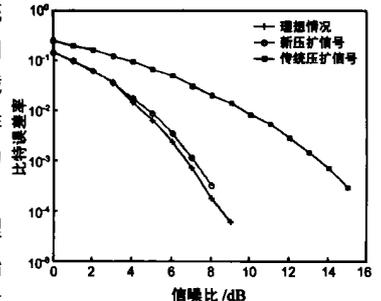


图8 压缩扩张技术获得的系统性能

AWGN 信道中得到的性能曲线, 是无编码的 OFDM 系统在 AWGN 信道下的最佳性能。仿真的传统压缩扩张和新压缩扩张性能曲线都是信号在经过各自的技术处理之后送到 HPA 中, 再将 HPA 的输出由 RF 发射送到 AWGN 中。图 8

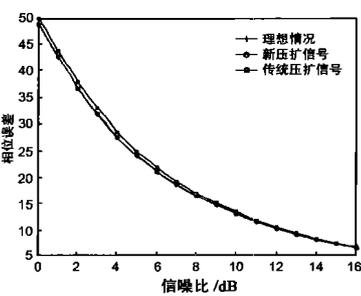


图 9 压缩扩张技术获得的相位误差

表明, 当给定误比特率 $BER = 10^{-3}$ 时, 原信号的信噪比 SNR 为 6.72dB, 传统压缩扩张和新压缩扩张所需信噪比分别约为 13.57dB 和 7.15dB, 同时从图 9 中看出新压缩扩张技术所获得的相位误差也比传统压缩扩张技术的要好。可见, 采用新压缩扩张技术比传统的压缩扩张技术具有更佳的系统性能。

5 结论

基于数值变换的预失真技术, 本文构造了一种新的压缩扩张技术来降低 OFDM 信号的 PAPR。采用该技术的 OFDM 系统性能要优于传统的压缩扩张技术。另一方面, 由于新的压缩扩张技术不需要进行任何参数的优选, 从而使得其计算复杂度比传统压缩扩张技术更低, 且其计算复杂度不随子载波数的增加而增加, 特别适合于多种调制方式和任意子载波数的 OFDM 系统。新的压缩扩张技术是一种降低 OFDM 系统 PAPR 非常实用的方法。

参考文献:

[1] T A Wilkinson, A E Jones. Combined coding for error control and increased robustness to system nonlinearities in OFDM[J]. Proc of IEEE 1996 VTC' 96, 1996, 46(2): 904- 908.

- [2] S H Muller, J B Hüber. OFDM with reduced peak to average power ratio by optimum combination of partial transmit sequences[J]. IEEE Electron Lett, 1997, 33(5): 368- 369.
- [3] J Armstrong. Peak to average reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering[J]. IEEE Electron Lett, 2002, 38(5): 246- 247.
- [4] Xianbin Wang, T T Tjhung, C S Ng. Reduction of peak to average power ratio of OFDM system using A companding technique[J]. IEEE Trans on Broadcasting, 1999, 45(3): 303- 307.
- [5] Anders Mattsson, Geoffrey Mendenhall, Tim Dittmer. Comments on reduction of peak to average power ratio of OFDM system using a companding technique[J]. IEEE Trans on Broadcasting, 1999, 45(4): 418- 419.
- [6] Xianbin Wang, T T Tjhung, C S Ng. Reply to the Comments on reduction of peak to average power ratio of OFDM system using a companding technique IEEE Transactions on Broadcasting 1999[J]. IEEE Trans on Broadcasting, 1999, 45(4): 420- 422.
- [7] 黄晓, 陆建华, 郑君里. 低复杂度 OFDM 信号峰均功率比压缩技术. 电子学报, 2003(3), 31: 398- 401.
Huang Xiao, Lu Jiannhua, Zheng Junli. Low complexity reduction of peak to average power ratio of OFDM signals[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(3): 398- 401.

作者简介:



江 涛 2004 年获华中科技大学电子与信息工程系信息与通信工程专业的博士学位, 2004 年 7 月赴英国 Brunel 大学工程与设计学院进行第四代移动通信系统的研究工作, 目前的主要研究兴趣包括: OFDM(包括 PAPR, 信道估计等)、UWB 技术、MIMO 和无线通信网络中的 QoS 研究等。E mail: jiang@brunel.ac.uk.