

低复杂度 OFDM 信号峰均功率比压缩技术

黄 晓,陆建华,郑君里
(清华大学电子工程系,北京 100084)

摘要: 本文提出了一种用于减小 OFDM 信号峰均功率比 (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR) 的压缩扩张变换技术. 该技术能够以相对较低的计算复杂度大大降低 OFDM 信号的 PAPR. 作为应用实例, 本文分析了线性压缩扩张、非线性对称压缩扩张和非线性准对称压缩扩张的 PAPR 改善幅度、计算复杂度、及其用于 OFDM 系统时对系统误比特率 (BER) 的改善等方面的性能. 实验仿真表明, 与采用传统的限幅滤波方法相比, 本文提出的技术可以获得较明显的性能增益.

关键词: 正交频分复用; 峰均功率比; 压缩扩张变换

中图分类号: TN915.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 03-0398-04

Low Complexity Reduction of Peak-to-Average Power Ratio of OFDM Signals

HUANG Xiao, LU Jian-hua, ZHENG Jun-li

(Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A novel companding transform is proposed to reduce Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signals. This proposed technique can effectively reduce PAPR with low computational complexity. For practical applications, linear, nonlinear-symmetrical and nonlinear-quasi-symmetrical companding transform schemes are analyzed in terms of their companding effects, computational complexity, and improvement in BER performance in OFDM systems. It is shown by computer simulations that the proposed technique can outperform the conventional clipping-filtering scheme substantially.

Key words: OFDM; PAPR; companding transform

1 引言

正交频分复用 (OFDM) 技术作为一种有效的宽带传输技术目前已被广泛应用到数字音频广播 (DAB)、数字视频广播 (DVB)、高清晰度电视 (HDTV) 等很多应用领域. 但是, OFDM 技术的一个主要问题是其使系统发射信号的峰值功率与平均功率的比值 (Peak-Average Power Ratio, PAPR) 较高, 从而导致 OFDM 系统对高功率放大器 (HPA) 线性动态范围的要求很高, 因而增加了系统实现的复杂度. 为了减小 OFDM 信号的 PAPR, 许多学者做了大量的研究. 研究表明, OFDM 技术将多路相互独立的信号在时域叠加后发送, 根据大数定理, 叠加后的信号波形的幅值服从高斯分布, 因而 PAPR 较高.

目前, 用以降低 PAPR 的做法有两类. 一类是在 OFDM 复用器之前对输入码流进行适当处理, 减小复用器各路信号的独立性, 例如用编码的办法^[1]; 或减少叠加时信号的数目, 例如用部分传输序列的办法^[2]等, 从而减低 PAPR. 还有一种用选择映射的办法, 即通过映射产生各路码流的所有可能的组合, 然后在其中选择一种组合方案, 使得经 IFFT 变换叠加后

信号的 PAPR 最小^[3]. 文献[4]将部分传输序列和选择映射的办法相结合, 进一步减少计算量. 但是, 当子载波数较大时, 上面的几种做法都需要较大的计算量^[4].

另一类是在复用器之后对 OFDM 信号进行处理. 最简单、最直观的做法就是对模拟信号进行限幅, 但是这将引入限幅噪声, 从而使系统性能恶化. 另一方面, 当用滤波的办法消除这些噪声时, 又会重新增大信号的 PAPR^[5]. 文献[6]中提出了一种利用非均匀量化中的压缩扩张技术来减小信号 PAPR 的办法. 这种办法虽然实现简单, 但是因为是在收发两端分别对信号进行直接的压缩和扩张, 且没有考虑信号功率或幅度的概率分布, 所以对信号 PAPR 的降低非常有限.

本文采用第二类方法并提出一种新的压缩扩张变换技术. 该技术不仅能降低信号的 PAPR, 而且能提高小信号的抗噪声性能. 采用该技术的 OFDM 系统不仅性能优于限幅滤波方案, 而且计算复杂度与编码、部分传输序列和选择映射等方案相比要小得多, 同时其计算复杂度不随子载波数的增加而增加.

2 压缩扩张变换原理

本文提出的压缩扩张变换,是一种基于数值变换的预失真方法.具体做法是在通信系统的发射端,通过数值变换将信号的功率进行重新分配,即利用压扩器增强小信号同时减弱大信号.进一步,由于 OFDM 信号幅度服从高斯分布,我们据此选择系统中压扩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的降低信号的 PAPR.图 1 所示是三种比较典型的压扩曲线.

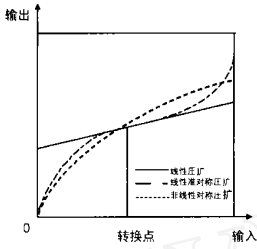


图 1 三种压缩扩张曲线

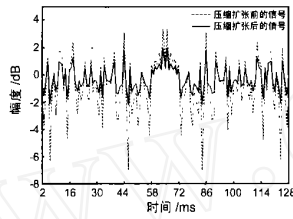


图 2 信号经线性压缩扩张前后的波形

图 2 给出了经线性压缩扩张前后信号的波形.在图中我们看到,压缩扩张使得小信号被放大,大信号被减弱,信号的峰值得到很好的抑制.与前面介绍的编码、部分传输序列和选择映射的方法相比,这种基于变换的压缩扩张技术的计算复杂度要小得多,并且计算复杂度不随子载波数的增加而增加.实现该技术,既可以采用存储查表法,也可以采用数字运算电路直接进行变换,并同时完成 D/A 变换.

3 压缩扩张变换的设计与分析

假设发送端和接收端压缩扩张前后的信号分别为 $S(t)$ 、 $S'(t)$ 和 $R(t)$ 、 $R'(t)$,其中 $S(t)$ 和 $R(t)$ 的模的期望值分别为 m 和 m' .同时,假设信道的乘性和加性噪声分别为 $H(t)$ 和 $n(t)$,那么

$$R(t) = H(t) \times S(t) + n(t) \tag{1}$$

其中, $n(t)$ 为均值为零,方差为 $\sigma_n^2 = N_0/2$ 的加性高斯白噪声(AWGN).

下面,我们分别以线性压缩扩张和非线性准对称压缩扩张为例说明压缩扩张技术的设计.

3.1 线性压缩扩张

对于线性压缩扩张有 $S'(t) = k \times S(t) + b \times \text{Sgn}[S(t)]$,其中 $\text{Sgn}[\cdot]$ 为符号函数, k 、 b 分别被称为斜率和截距,它们分别满足 $0 < k < 1$ 和 $b = (1 - k) \times m$.对于接收端,

$$R(t) = \{ R'(t) - b \times \text{Sgn}[R'(t)] \} / k \tag{2}$$

式中 $b = (1 - k) \times m$.又因为

$$m = E[|R(t)|] = E[|H(t) \times S(t) + n(t)|] = E[|H(t)|] \times m - \sqrt{N_0/2} \tag{3}$$

其中, $E[\cdot]$ 表示取数学期望.将式(1)代入式(2),我们得到

$$R(t) = H(t) \times S(t) + \frac{n(t) + \{ H(t) \times m \times \text{Sgn}[S(t)] - m \times \text{Sgn}[R(t)] \} \times (1 - k)}{k} \tag{4}$$

上式中第二项为噪声项,令其为 $e(t)$,所以代入式(3),则有

$$e(t) = \left\{ m[|H(t)| \times \text{Sgn}[S(t)] - E[|H(t)|] \times \text{Sgn}[R(t)]] + \text{Sgn}[R(t)] \sqrt{\frac{N_0}{2}} \right\} \times \left(\frac{1}{k} - 1 \right) + \frac{n(t)}{k} \tag{5}$$

这里, $e(t)$ 表示由于压缩扩张引起的瞬态误差,其中包括放大的高斯噪声项.式(5)给出了 $e(t)$ 的上限,它与压扩参数 k 的有关.

定义压扩增益

$$G = \frac{PAPR_{S'(t)}}{PAPR_{S(t)}} \tag{6}$$

对于线性压扩,经计算得

$$G = \left[\frac{1}{k + \frac{1-k}{\sqrt{PAPR_{S(t)}}}} \right]^2 \tag{7}$$

当 $PAPR_{S(t)}$ 较大时,我们有 $G \approx 1/k^2$.可见,对于线性压扩来说,PAPR 的改善幅度 G 和压扩误差 $e(t)$ 都随 k 的增加而减小.因此,在实际系统中,必须合理的设置 k 值.

3.2 非线性准对称压缩扩张

对于非线性准对称压缩扩张,分别定义 u 、 v 为压扩率和压扩转换点.这时,

$$S'(t) = \frac{v \times S(t)}{|S(t)| \times \ln(1+u)} \times \ln \left[1 + \frac{u}{v} \times |S(t)| \right] \tag{8}$$

在接收端,信号经过如下反变换,

$$R(t) = \frac{v \times R'(t)}{u \times |R'(t)|} \times \left\{ \exp \left[\frac{|R'(t)| \times \ln(1+u)}{v} \right] - 1 \right\} \tag{9}$$

对于 AWGN 信道 ($H(t) = 1$),当信噪比足够大时,有

$$\frac{R(t)}{|R(t)|} = \frac{S(t)}{|S(t)|}, \text{所以式(9)可近似为}$$

$$R(t) = S(t) + \left[\ln(1+u) \times \left(\frac{1}{u} + \frac{|S(t)|}{v} \right) \right] \times n(t) \tag{10}$$

上式中第二项为噪声项 $e(t)$,令 $E[e(t)^2]$ 最小,即可求得最优的 u 和 v 值.

现在计算压扩增益 G ,根据式(6)定义有

$$G = \left[\frac{u \times \frac{A}{v}}{\ln(1+u \times \frac{A}{v})} \right]^2 \tag{11}$$

其中, A 表示原始信号 $S(t)$ 幅度的峰值.因为 $u \times \frac{A}{v} > 0$,所以

$G > 1$.同时如果为了使 G 尽可能的大,应该增大 $u \times \frac{A}{v}$.对于传统的压扩方法 ($v = A$),为获得大的压扩增益,往往需要较大的 u 值,但从式(10)中可以看出,这样会增大压扩引起的失真,导致系统性能变坏.对于本文提出的方法,可以通过调节参数 v 来弥补这种由失真造成的压扩增益受限的问题,因而可望在误码率与 PAPR 方面获得较好的折衷.

3.3 压扩参数选取及其计算机仿真

如图 3 所示,OFDM 基带仿真系统中每个子载波均采用 QPSK 映射方式,假设子载波数为 128,OFDM 信号经压缩扩张变换器处理后,送入后级功率放大器(图中未画出).接着,该

信号被送入信道,信道模型为加性高斯白噪声(AWGN)信道。而接受信号经反变换后被送往 FFT 块进行解调,随后经过并串转换和 QPSK 逆映射得到所需要的比特流。显然,压扩技术对 OFDM 信号的 PAPR 的改善不应受信噪比(SNR)影响,考虑到实际的应用系统,我们给定 SNR = 10dB,然后考察在上述仿真条件下不同参数对 OFDM 信号 PAPR 的改善情况和对系统误比特率(BER)性能的影响。

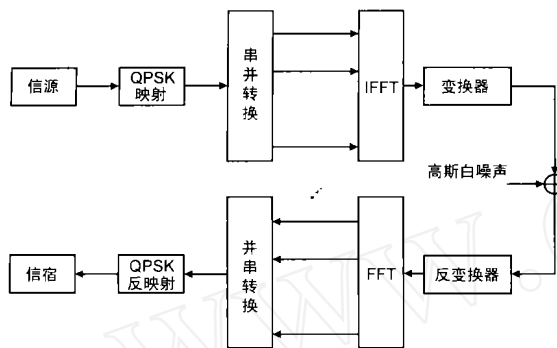


图 3 OFDM 基带仿真系统框图

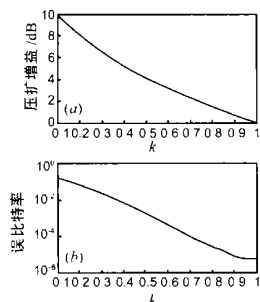


图 4 线性压扩中 k 的影响

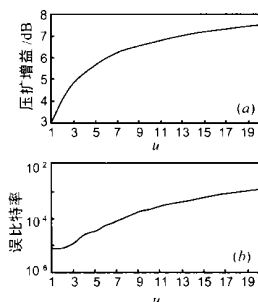


图 5 非线性准对称压扩中 u 的影响

对于线性压扩,图 4 表明,随着斜率 k 的减小, G 增大,但是 OFDM 系统的误码率也随之增加。作为一种折衷,我们可以取 $k = 0.5$ 。而对于非线性准对称压扩,我们希望能以较小的功率代价换取较大的 PAPR 改善或是较小的 BER。如图 5 所示,当压扩率 u 变化时,PAPR 可以降低 3 ~ 7.5 dB。

4 性能评估与比较

在前面两节,通过分析和计算机仿真,我们看到为在 OFDM 信号 PAPR 和系统 BER 性能之间实现一个满意的折衷,我们必须合理的选取压扩参数。这一节,我们通过计算机仿真(仿真环境同前一节)给出在合理的参数设置下,线性压扩、非线性对称压扩以及非线性准对称压扩等三种压缩扩张方案对于不同的信噪比所能实现的 PAPR 改善幅度和所增加的平均功率及系统的 BER 性能。作为比较,我们也给出同样条件下为达到相同的 PAPR 改善,采用限幅滤波的方法的 BER 性能^[7]。比较结果如图 6 所示。注意,图中标注“无失真”的曲线是在没有考虑任何失真的情况下得到的 BER-SNR 性能曲线,是无编码的 OFDM 系统在 AWGN 信道下的最佳性能。

如图 6 所示,三种压缩扩张均能在不增加平均功率的情

况下,有效地降低信号的 PAPR。其中,当参数 k 取为 0.5 时,线性压缩扩张可以实现 4.1dB 的压扩增益;为实现同样的压扩增益和较好的 BER 性能,非线性准对称压缩扩张的参数 u 被设定为 2;对于非线性对称压缩扩张,当参数 u 等于 4 时,信号的 PAPR 约降低 3dB。因此,本文所提出的压扩技术能够在保证一定误码率要求的情况下,有效地避免信号进入功率放大器的非线性区从而避免由此引起的非线性失真。进一步由图 6 表明,根据此参数设置,当给定误比特率 BER = 10^{-5} 时,线性压缩扩张、非线性对称压缩扩张和非线性准对称压缩扩张所需的信噪比分别为 14dB、13.5dB 和 12.2dB。而对于同样的 PAPR 改善,采用现有的限幅滤波的方法所需的信噪比为 18dB。

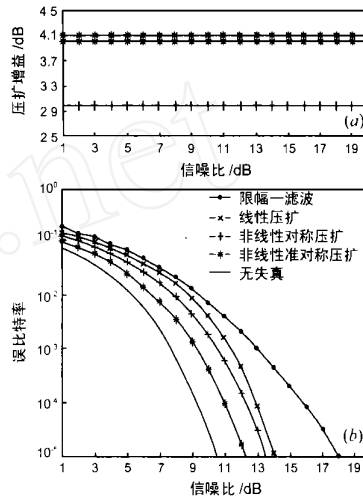


图 6 压扩变换技术的性能比较

5 结论

为了在满足一定误码率要求的情况下,更大地压缩 OFDM 信号的 PAPR,我们提出了一种基于变换的压缩扩张技术。采用该技术的 OFDM 系统性能优于传统的限幅滤波方案。在 AWGN 信道,且 BER = 10^{-5} 时,对于相同的 PAPR 改善,与采用限幅滤波的方法相比,线性压缩扩张,非线性对称压缩扩张和非线性准对称压缩扩张通过系统合理的参数选取分别有 4dB, 4.5dB 和 5.8dB 的信噪比改善。另一方面,本文提出的技术的计算复杂度远远小于编码、部分传输序列和选择映射等方案,并且该计算复杂度不随子载波数的增加而增加,有利于在实际系统中应用推广。

参考文献:

- [1] T A Wilkinson, A E Jones. Combined coding for error control and increased robustness to system nonlinearities in OFDM [A]. Proc of IEEE 1996 VTC [C]. USA: IEEE, 1996. 904 - 908.
- [2] S H Müller, J B Huber. OFDM with reduced peak-to-average power ratio by optimum combination of partial transmit sequences [J]. Elec Letters, 1997, 33(5): 368 - 369.
- [3] R W Bauml, R F H. Fischer, J B Huber. Reduced peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selective mapping [J]. Elec Letters, 1996, 32(22): 2056 - 2057.
- [4] L J Cimini Jr, N R Sollenberger. Peak-to-average power ratio reduction of an OFDM signal using partial transmit sequences [A]. Proc of 1999 IEEE VTC [C]. USA: IEEE, 1999. 511 - 515.
- [5] Dukhyun Kim, Geron L. Stuber. Clipping noise mitigation for OFDM by decision-aided reconstruction [J]. IEEE Comm Letters, 1999, 33(1): 4

- 6.

- [6] 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 :303 - 307.

- [7] Xiaodong Li ,Leonard J Gmini Jr. Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM [A]. Proc of IEEE 1997 VTC [C]. USA : IEEE ,1997. 1634 - 1638.

作者简介 :



黄 晓 男,1978 年 2 月出生于云南昆明,2000 年获北京理工大学电子工程系工学学士学位,自 2000 年起在清华大学电子工程系微波与数字通信国家重点实验室攻读博士学位,主要研究方向为面向无线多媒体通信的正交频分复用技术.



陆建华 男,1963 年 7 月出生于江苏,分别于 1986 年和 1989 年获清华大学电子工程系工学学士和工学硕士学位,并于 1998 年香港科技大学电子与电气工程系博士学位,现任清华大学电子工程系教授、博士生导师,研究方向包括无线通信系统、无线多媒体通信、图像通信以及无线网络等,IEEE 通信学会以及 IEEE 信号处理学会会员.

www.cnki.net