

一种新的降低 OFDM 峰均比的压扩算法

王晓丹, 杨守义, 穆晓敏, 齐 林

WANG Xiao-dan, YANG Shou-yi, MU Xiao-min, QI Lin

郑州大学 信息工程学院, 郑州 450052

College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China

E-mail: 05311414@gs.zzu.edu.cn

WANG Xiao-dan, YANG Shou-yi, MU Xiao-min, et al. New companding scheme of reducing PAPR of OFDM signal. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(16): 111-113.

Abstract: A novel companding transform scheme is proposed to reduced the Peak-to-Average Ratio of Orthogonal Frequency Division Multiplexing signals, compared with the improved companding scheme, the proposed scheme is illustrated in detail and analyzed in terms of reducing PAPR and improvement in BER performance in OFDM system. The simulation results confirm that the suggested scheme can outperform the improved companding scheme substantially.

Key words: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); Peak-to-Average Power Ratio (PAPR); Bit Error Ratio (BER)

摘 要: 提出了一种新的用于减小 OFDM 信号峰均功率比的压缩扩张技术, 通过与改进的压缩扩张技术的对比, 详细介绍了新方法并分析了其对 PAPR 的改善程度及其用于 OFDM 系统时对系统误比特率的改善等性能。实验仿真结果说明, 新的非线性压缩扩张技术可以获得更为高效的系统性能增益。

关键词: 正交频分复用; 峰均比; 误码率

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.16.034 文章编号: 1002-8331(2008)16-0111-03 文献标识码: A 中图分类号: TN914-51

1 引言

正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 是一种多载波调制技术, 它的基本思想是: 把高速数据流分散到多个正交的子载波上传输, 从而使子载波上的符号速率大幅度降低, 符号持续时间大大加长。因此 OFDM 技术具有很强的抗多径衰落和窄带干扰的能力, 并具有很高的频带利用率。OFDM 系统可以很容易地通过使用不同数量的子信道来实现上行和下行链路中不同的传输速率, 已广泛使用在非对称数字用户线 (ADSL)、数字音频广播 (DAB)、数字视频广播 (DVB) 等领域。但是 OFDM 系统内由于存在多个正交的子载波, 而且其输出信号是多个子信道信号的叠加, 因此与单载波系统相比, 它易受频率偏差的影响, 且存在较高的峰值平均功率比。

OFDM 信号具有很高的峰均比, 这就要求系统发送端的高功率放大器 (HPA) 具有很高的线性范围, 接收端对前端放大器以及 A/D 变换器的线性度要求也很高, 从而提高了系统的复杂度, 并对移动终端的电源提出了很高的要求。因此, 高的峰均比一直是阻碍 OFDM 技术得以实际应用的缺点之一, 为此人们提出了很多降低 PAPR (Peak-to-Average Power Ratio, 峰均比) 方法。

文献[1]提出了一种基于 μ 率的压缩扩张技术来降低 PAPR, 这种方法实现简单, 降低 PAPR 效果也好于剪波法, 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, 因而其效果非常有限。

本文提出了一种新的基于变换的压缩扩张算法, 不仅能降低信号的 PAPR, 而且能提高小信号的抗噪声性能, 进而降低系统的误码率。

2 OFDM 模型及其峰均比

OFDM 的离散复基带信号可以表示为:

$$s(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} a_k \exp(j \frac{2\pi kn}{N}), n=0, \dots, N-1 \quad (1)$$

其中: $a_k (k=0, \dots, N-1)$ 为频域符号, 可以为 MQAM 或 MPSK 调制, $s(n)$ 为 OFDM 的时域信号。

峰均比可以被定义为:

$$PAPR = 10 \lg \frac{\max \{|x_n|\}}{E\{|x_n|\}} \quad (2)$$

表示在一个 OFDM 时域符号周期内, 峰值功率与平均功率的比值; 其中, x_n 表示经过 IFFT 运算之后所得到的输出信号, 即

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k W_N^{nk} \quad (3)$$

设输入频域符号 $a_k (k=0, \dots, N-1)$ 的平均能量为 1, 根据中

基金项目: 河南省重点科技攻关项目 (the Key Technologies R&D Program of Henan Province, China under Grant No.0623051400)。

作者简介: 王晓丹 (1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: MIMO-OFDM 系统中峰均比降低算法; 杨守义 (1965-), 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 信源编码、无线通信 (OFDM、MIMO) 等; 穆晓敏 (1955-), 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 通信系统的抗干扰技术、无线通信信道特性研究等; 齐林 (1961-), 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 现代信号处理、通信信号处理等。

收稿日期: 2007-09-11

修回日期: 2007-12-12

心极限定理, 当子载波数目 N 较大时 ($N > 64$), 经 IFFT 变换后的 OFDM 时域信号 $s(n)$ 的实部和虚部均服从均值为 0, 方差为 0.5 的高斯分布, 即实部和虚部的方差各为输入符号平均能量的一半, 实部或虚部的概率密度函数为:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2) \quad (4)$$

这时, 时域信号的幅度 $|s(n)|$, 也即信号的复包络, 服从瑞利分布。如果假设 $r = |s(n)|$, 则幅度的概率密度函数为:

$$p(r) = 2r \exp(-r^2) \quad r \geq 0 \quad (5)$$

幅度 r 的概率分布函数为:

$$F_r(r) = 1 - \exp(-r^2) \quad r \geq 0 \quad (6)$$

而其功率分布则要服从两个自由度的中心 χ^2 分布, 其中均值为 0, 方差为 1, 而且容易得知, 自由度为 2 的中心 χ^2 分布的概率密度函数为 $p_{Power}(y) = \exp(-y)$, 因此可以计算得到其累积分布函数(CDF)为:

$$P\{\text{Power} \leq z\} = \int_0^z \exp(-y) dy = 1 - \exp(-z) \quad (7)$$

那么 OFDM 符号周期内的 N 个采样值当中每个采样值的 PAR (假设采用平均功率归一化, 所以也就是其功率值) 都小于门限值 z 的概率分布应该为:

$$P\{\text{PAR} \leq z\} = (1 - \exp(-z))^N \quad (8)$$

这里计算峰均比超过某一门限值 z 的概率, 即互补累积分布函数 CCDF 衡量 OFDM 系统得 PAPR 分布:

$$P\{\text{PAR} > z\} = 1 - (1 - \exp(-z))^N \quad (9)$$

3 降低 PAPR 的压缩扩张变换

在 OFDM 系统中使用的压缩扩张变换, 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, 利用压扩器增强小信号的同时减弱大信号, 以降低 OFDM 的峰均比。

这种压扩方法与分组编码^[2]、部分传输序列^[3]和选择映射^[4]的方法相比, 计算复杂度要小得多, 且由于压扩变换只是对发送或接收的数据进行数值变换, 与子载波数无关, 因此计算复杂度不随子载波数的增加而增加。

压扩函数主要分为线性压扩函数和非线性压扩函数^[5], 这里是对 OFDM 的幅度为压扩对象的。

系统模型:

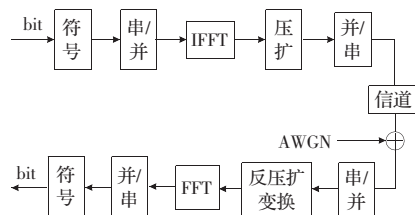


图1 对时域信号进行压扩变换的系统框图

在 OFDM 中理想的降低 PAPR 的方法是保持相位不变幅值化为 1 后再乘以 OFDM 幅度的最大值, 这样可以使 PAPR 恒为 0, 然而这种方法在接收端利用接收到的数据很难恢复出原来的数据, 即误码率很大^[6]。

文献[5, 7]提到了另一种改进的压扩算法, 即采取式(10)对经过 IFFT 变换后的数据 $s(n)$ 的幅度进行压扩:

$$s_c = \frac{vs(n)}{\ln(1 + \frac{\mu}{v} |s(n)|)} \ln(1 + \frac{\mu}{v} |s(n)|) \quad (10)$$

其中 v 表示 OFDM 符号的平均幅值, 在接收端假设经过串并转换后的数据为 $r(n)$, 经过解压后为 $y(n)$, 则在接收端利用下式解压:

$$y(n) = \frac{v'r(n)}{\mu |r(n)|} (e^{\frac{v'r(n) \ln(1 + \mu/v)}{v'}} - 1) \quad (11)$$

其中 v' 表示接收信号 $r(n)$ 的平均幅值。本文在不降低系统性能的基础上提出了一种新的发送端复杂度低的压扩算法, 用到的函数如下:

$$s_c(n) = k \left(1 - \frac{|s(n)|}{ca}\right) s(n) \quad (12)$$

其中, c 为 $s(n)$ 的最大幅值的倍数, 设置此参数是为了在系统误比特率和峰均比之间取一个合理的折中; a 为 $s(n)$ 的最大幅值, $s_c(n)$ 是压扩后的数据, 设置系数 k 是为了使压扩前后的平均功率相等。即

$$k = \sqrt{\frac{E\{|s(n)|\}}{E\{|s_c(n)|\}}} \quad (13)$$

在接收端, 有两个函数可用来自解压扩, 式(14)和式(15):

$$y(n) = \begin{cases} \frac{car(n)}{2|r(n)|} & |r(n)| > \frac{kca}{4} \\ \frac{(ca - \sqrt{(ca)^2 - 4ca \frac{|r(n)|}{k}})}{2|r(n)|} r(n) & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

$$y(n) = \begin{cases} \frac{calr(n)}{2r(n)} & |r(n)| > \frac{kca}{4} \\ \frac{(ca + \sqrt{(ca)^2 - 4ca \frac{|r(n)|}{k}})}{2|r(n)|} r(n) & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

考虑到系统的复杂度和幅值大于 ca 一半的信号占少数, 在接收端只用了一个函数, 这也是此压扩算法的一个缺点, 即在发射端原来不一样的数据经过变换后的结果可能会一样, 但是变换系数不一样, 一个会大于 0.5, 另一个会小于 0.5, 在接收端利用接收到的数据来恢复时是没法分辨的。针对这个缺点, 设置参数 c , 靠改变 c 的值来改变误码率, 如当 c 的值取 2 时, 所有压扩系数都会大于 0.5, 变换后的误码率在 10^{-4} 时比变换前的误比特率只有 1 dB 的恶化, 当 c 为 4 时, 误比特率几乎和变换前的误比特率完全重合。使用 4 倍过采样, 512 个子载波, QPSK 调制, 高斯信道仿真如图 2。

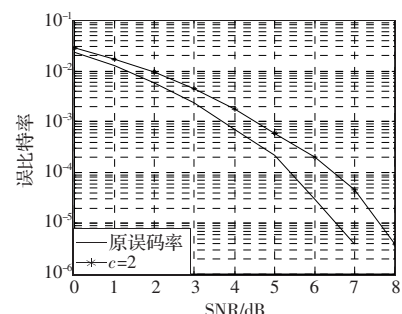


图2 $c=2$ 时的误比特率

4 仿真结果

本文的图形均为使用 512 个子载波, 4 倍过采样, QPSK 调制, 经过 Matlab 7.2 仿真得到。图 3 为峰均比降低程度的一个比较, 从中容易看出, 当 c 为 1 时, 在 CCDF 为 10^{-4} 时, 峰均比能降低 8.7 dB, 当 c 取 1.3、1.5 和 1.8 时峰均比分别能降低 7.2 dB、6.5 dB、4.8 dB; 文[6]中的方法当 u 取 1 和 3 时峰均比分别能得

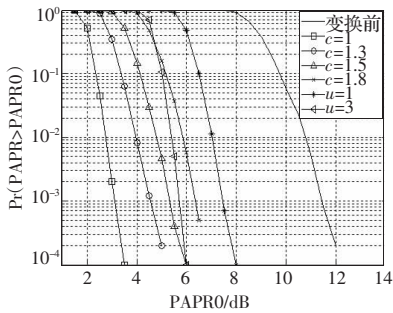


图3 c取不同值时峰均比的比较

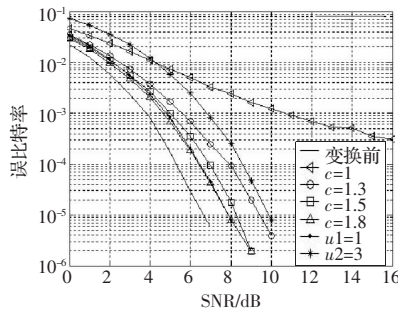


图4 c取不同值时误比特率的比较

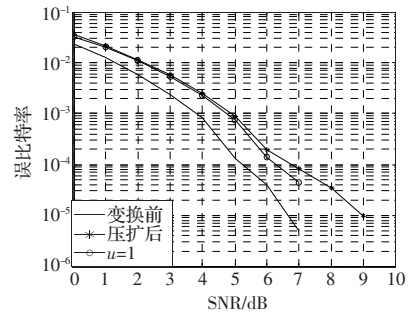


图5 c=1时牺牲带宽换取的误比特率的减小

到 4.5 dB、6.5 dB 的改善。

图 4 为误码率的比较,本文的误码率没有考虑功率放大器的非线性,在 10^{-4} 时除了 $c=1$ 时误码率较大外, c 为 1.3、1.5、1.8 时只降低了 2.5 dB、1.5 dB、1 dB,文献[6]在 $u=1$ 和 3 时分别相差 1 dB 和 3 dB。综合考虑,当 c 取 1.3 和 1.5 时效果较好。

另外,如果想换取更小的误比特率,可以适当牺牲一些带宽来换取误比特率的改善,如传送那些系数小于 0.5 的数据的下标,在接收端就用式(15)来解压,其余的还用式(14)加压。图 5 为这种情况下与没有经过压扩变换和用 $u=1$ 的经过改进的压扩变换的误比特率的比较,从图上易看出误比特率得到了明显的改善。

5 结束语

本文提出了一种新的基于压扩算法的降低系统峰均比的方法,经过计算机仿真,当参数 c 取 1.3 和 1.5 时分别使峰均比降低 7.2 dB 和 6.5 dB,且误比特率为 10^{-4} 时信噪比分别只降低了 2.5 dB 和 1.5 dB。本文只是对这种压扩算法的原理进行了介绍,在实际应用中为了进一步降低系统复杂度还可以对输入数据的最大幅值进行估计,用常数代替 ca 的值,就像文[7]中 u 的取值一样。

参考文献:

- [1] Wang Xian-bin, Tjhung T T, Ng C S.Reduction of peak-to-average power ratio of OFDM system using a companding technique[J]. IEEE Trans on Broadcasting, 1999, 45(3):303-307.
- [2] Wilkinson T A, Jones A E.Combined coding for error control and increased robustness to system nonlinearities in OFDM[C]//Proc of IEEE 1996 VTC.USA:IEEE, 1996:904-908.
- [3] Muller S H, Huber J B.OFDM with reduced peak-to-average power ratio by optimum combination of partial transmit sequences[J]. Elec Letters, 1997, 33(5):368-369.
- [4] Bauml R W, Fischer R, Huber J B.Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selected mapping [J]. Electronics Letters, 1996, 32:2056-2057.
- [5] 黄晓, 陆建华, 郑君里.低复杂度 OFDM 信号的峰均功率比压缩技术[J].电子学报, 2003, 31(3).
- [6] Ren Guang-liang, Zhang Hui-ning, Chang Yi-lin, et al.A self companding transform to reduce peak-to-average power ratio in OFDM based WLANs[C]//Proceedings of 2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems, 2006:1142-1146.
- [7] 佟学俭, 罗涛.OFDM 移动通信技术原理与应用[M].北京:人民邮电出版社, 2003:53-55.

(上接 86 页)

后得到的密文为 64 位的十六进制数 379CB171B20D7A23;对 64 位的密文十六进制数 379CB171B20D7A23 解密后得到 64 位明文十六进制数 636F6D7075746572。

以上的仿真结果证明了模块加/解密过程的正确性。另外通过查阅相关文献[2]中给出的 DES 加密测试标准数据可以知道,以上仿真结果与测试数据完全一致,从而证明了 DES 加/解密功能设计的正确性。

5 结论

该设计是基于 Altera 公司的 Cyclone 系列 FPGA 的加密算法的硬件实现方法的研究,论文通过对整个加密算法的分析,提出了较为合理的设计方法和实现途径,通过芯片 EP1C6F256C8 对设计进行仿真测试,结果准确无误,最后,在系统时钟(CLK)为 25 MHz 条件下,与微处理器 C8051F020 共同对总线数据加/解密传输测试,测试结果显示系统在 1 μ s 时间内实现对 64 bit 数据的连续加/解密传输,达到了预先的设计要求。通过适当改进,可以设计出通用型芯片实现对通信数据的实时、可靠加密传输。

参考文献:

- [1] 冯登国, 吴文玲.Block ciphers 分组密码的设计与分析[M].北京:清华大学出版社, 2000:50-98.
- [2] 卢开澄.计算机密码学-计算机网络中的数据保密与安全[M].3 版.北京:清华大学出版社, 2004:52-73.
- [3] 常晓明.Verilog-HDL 实践与应用系统设计[M].北京:北京航空航天大学出版社, 2003:40-156.
- [4] 张洁, 朱丽娟.DES 加密算法分析与实现[J].软件导刊, 2007(3): 95-97.
- [5] Trappe W, Washington L C.Introduction to cryptography with coding theory[M].[S.l.]:Science Press, 2004:35-90.
- [6] 吴梦达, 李兵, 汪文浩.高等工程数学[M].北京:科学出版社, 2004: 2-102.
- [7] 段吉海, 黄智伟.基于 FPGA 的数字通信系统建模与设计[M].北京:电子工业出版社, 2004:44-186.
- [8] Verbaauwhede I.Security and performance optimization of a new DES encryption chip.ISSC, 23(3).
- [9] 李培金.C 语言程序设计案例教程[M].西安:西安电子科技大学出版社, 2003:100-230.
- [10] 路而红.专用集成电路设计与电子设计自动化[M].北京:清华大学出版社, 2004:286-380.