

一种降低 OFDM 信号峰均功率比的预编码方法

黄润林¹, 龙 奕¹, 尹忠科²

(1. 贵州大学电气工程学院, 贵阳 550003; 2. 西南交通大学信息科学与技术学院, 成都 610031)

摘要: 正交频分复用(OFDM)系统的一大缺点就是具有较高的峰值平均功率比(PAPR),大大降低了线性功率放大器的效率。提出了一种用预编码方法,通过引入预编码矩阵将映射后的数据进行功率分配,从而降低 OFDM 信号的 PAPR。该方法不影响频谱效率,不需要进行附加运算以及收发两端的握手信息。计算机仿真表明对传统的 64 个子载波 OFDM 系统 PAPR 有将近 9dB 的改善。

关键词: 峰值平均功率比;正交频分复用;预编码;根升余弦窗

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-06-0884-04

A precoding method used to reduce peak-to-average power ratio of OFDM signal

HUANG Run-lin¹, LONG Yi¹, YIN Zhong-ke²

(1. School of Electric Engineering of Guizhou University, Guiyang 550003, China;

2. School of Information Science & Technology of Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: One of the shortcomings of OFDM system is that it has high peak-to-average power ratio (PAPR) which greatly reduces the efficiency of the High Power Amplifier (HPA). A kind of pre-coding method is proposed to lower PAPR of OFDM signal by dispatching power to the projected data by introducing pre-coded matrix. This method does not have any additional computations and hand-shaking information at both transmitter and receiver ends. Simulation shows that there is about 9dB improvement compared to conventional OFDM system with 64 subcarriers.

Key words: PAPR; OFDM; precoding; RRC

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)、无线局域网(W-LAN)、无线城域网(W-MAN)及超宽带(UWB)等很多应用领域。但是 OFDM 技术的一个主要问题是其系统发射信号的峰值功率与平均功率的比值(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,从而增加了系统实现的复杂度与成本。

为了减小 OFDM 信号的 PAPR,许多学者做了大量的研究。大体上可以分为两类:一类是信号失真的方法,如限幅技术、压缩扩张变换、加窗等技术。这种方法是在较大 PAPR 的 OFDM 符号上做非线性变换,达到降低 PAPR 值。该技术不同程度地引入了信号的失真及频谱带内、带外噪声。但由于这种技术实现相对简单,所以在对误比特率(BER)要求不高的环境下有很多应用;另外一类技术是不引入信号失真的方式,在信号进入非线性器件前端进行处理。但是这种方法要不同程度的引入冗余信息和复杂度的提高,如编码技术、部分传输序列(PTS)、选择映射(SLM)等方法^[1]。由于芯片制造工艺的不断提升,高速 DSP 及 FPGA 器件的出现,使得信号无失真的方法得到广泛关注。

本文提出一种基于信号无失真的处理方法来降低 OFDM 系统的 PAPR。基带映射后的数据经过预

收稿日期:2008-01-20;修回日期:2008-04-10

基金项目:国家自然科学基金项目(60772084)

作者简介:黄润林(1965-),男,讲师,研究方向为信息处理与通信工程。

通讯作者:黄润林,E-mail:zyd_21cn@yahoo.cn

编码器,改变原始数据相位与幅度分布情况,然后进行 OFDM 调制与传输。仿真表明该方法能有效降低 OFDM 系统 PAPR,而对 OFDM 信号的频谱、带宽不会产生影响;而且对以及整个系统误比特率性能有一定的改善作用。

2 系统模型

对于含有 N 个子信道,符号宽度为 T 的 OFDM 符号,复基带信号可以表示为:

$$s(t) = \sum_{i=-N/2}^{N/2-1} d_i \exp[j2\pi(f_c - \frac{i+0.5}{T})(t-t_s)] \quad (1)$$

其中 $t_s \leq t \leq t_s + T$, t_s 表示时间基准, d_i 表示分配给每个子信道的复数据, f_c 为载波频率,将数据 d_i 搬到频率为 $f_c + i/T$ 的子载波上。上述表达式可以理解作为一种基于振荡器的时域连续 OFDM 调制解调系统。离散采样的 OFDM 信号可以表示为:

$$s(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{j2\pi \frac{nk}{N}} \quad (0 \leq n \leq N-1) \quad (2)$$

文献[2]提出一种基于脉冲成形技术降低 OFDM 系统峰值平均功率比的方法,采用不同的子载波波形对映射到该载波上的数据进行成形,然后对其进行 OFDM 调制。通过成型脉冲将各个子载波的波形进行调整,使调制符号的峰值在不同的时刻出现,达到降低 PAPR 的目的。

基于预编码的方法从这种方式演化而来,对于采用 QAM、QPSK 等映射方式的 OFDM 系统,将速率为 $1/T_s$ 的串型数据流转化为 N 路并行数据,并行数据经过预编码器再送入 IFFT 调制。基于预编码的离散系统模型如图 1 所示:

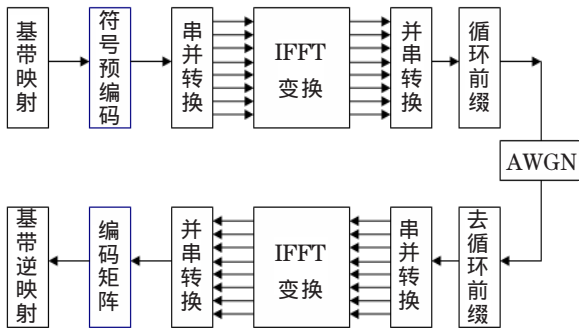


图 1 基于预编码技术的 OFDM 系统框图

Fig.1 The block diagram of precoding OFDM system

3 峰值平均功率比的抑制

3.1 峰均比的描述

OFDM 多载波调制系统最大的弊端就是峰值

包络抖动厉害,通常使用峰值平均功率比(PAPR)来描述,PAPR 定义为:

$$PAPR_{dB} = \max_{0 \leq t \leq T} |s(t)|^2 / \text{mean} |s(t)|^2 \quad (3)$$

其中 $s(t)$ 为等效地通 OFDM 符号, T 为 OFDM 符号长度。通常使用互补累计分布函数(CCDF)来描述 PAPR 的分布情况。为了能精确反映连续信号的 PAPR,一般采用 4 倍过采样的离散信号的峰均比来模拟连续信号的峰值平均功率比[2]。过采样通过在 OFDM 系统串并转换后的序列的中间或尾部补

零来实现,例如: $x_k' = \begin{cases} x_k, & k < N/2 \\ 0, & \text{others} \\ x_k, & \alpha N - N/2 \leq k < \alpha N \end{cases}$, 其中 α

为过采样级数, N 为原始离散信号 x 的长度。

3.2 预编码矩阵构成

OFDM 调制的子载波相位一致时,将调制符号峰值相叠加可产生很高的峰值功率。改善调制符号的 d_i 之间的相关性可以降低 PAPR[3,4]。调制符号之间的相关性可以通过对基带二进制数据进行编码的方式来得到,本文采用构造预编码矩阵来引入子载波之间的相关性。预编码矩阵作用于 OFDM 调制之前,可以将这一过程视为对分配到各个子载波的频域数据进行整形。预编码矩阵可以定义为:

$$P = \begin{bmatrix} p_{0,0} & p_{0,1} & p_{0,2} & \cdots & p_{0,N-1} \\ p_{1,0} & p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & p_{1,N-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{L,0} & p_{L,1} & p_{L,2} & \cdots & p_{L,N-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 N 为子载波数目, $L = N + \ln$, $\ln \in (0, N)$ 为扩展长度, $P_{i,k}$ 为第 k 个子载波上,第 i 个采样点的值。另外该预编码矩阵必须满足 $P^*P = I$, 这样才能在接收端正确的恢复数据,其中矩阵 I 为 $N \times N$ 的单位阵, P^* 为预编码矩阵 P 的共轭转秩。

采用预编码的 OFDM 发射机数学模型为:输入二进制比特信息经过基带映射为基带复数据,可以表示为 $X = [x_0, x_1, \cdots, x_{N-1}]$;

经过预编码后复信号 $\tilde{X} = PX = [\tilde{x}_0, \tilde{x}_1, \cdots, \tilde{x}_{L-1}]$, 其中 $\tilde{x}_i = \sum_{m=0}^{N-1} P_{im} X_m$, 经 OFDM 调制后输出数据为:

$$y(t) = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=0}^{L-1} \tilde{X}_i e^{-j2\pi i t/T} = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{N-1} P_{im} X_m e^{-j2\pi i t/T}$$

在理想信道,良好的时间同步与载波同步情况下,信号经过 OFDM 解调后进行解码后为: $X' = \tilde{P}^* \tilde{R} = [x_0', x_1', \cdots, x_{N-1}']$, 其中 $\tilde{R}$ 为 OFDM 解调后的数据, $x_1' = \sum_{i=0}^{L-1} P_{im}^* \tilde{R}_{m0}$ 。在满足 $P^*P = I$ 的情况下, X' 表示经过基

带逆映射后的数据。从数学模型中可以看出,采用预编码的方法对原始信号做了扩展,将 N 个数据的功率分担到 L 个数据上,而且改变了原始 OFDM 符号中各采样点的相位分布,从而使 PAPR 得到降低。

3.3 窗函数的选取

文献[4]给出了在满足子载波之间的正交性,成形波形函数 $P(t)$ 的具体形式表示为:

$$p_k(t) = \sum_{i=0}^{L-1} c_i e^{-j2\pi i k/N} e^{j2\pi i t/T} \quad (5)$$

其中 $c_i = (1/T)P(i/T)$ 表示选择窗函数傅立叶级数的系数, T 为 OFDM 符号周期。式(5)实质上是 $p_{i,k} = c_i e^{-j2\pi i k/N}$ 的傅立叶逆变换。同时第 k 个子载波上脉冲成形函数波形 $p_k(t)$ 与 $p_0(t)$ 满足如下关系: $p_k(t) = p_0(t - kTs)$, 实质是将子载波波形进行循环位移,以错开峰值数据相加造成较大峰均比数据的产生,由此在频域上合成预编码矩阵。

由于窗函数频谱带外衰减特性直接影响到 OFDM 信号的频谱,考虑到加入预编码模块对 OFDM 信号的波形、频谱等的影响,本文选用根均方升余弦窗(RRC)构成预编码器。RRC 窗函数的傅立叶变换形式为:

$$p_{rc}(f) = \begin{cases} T_s \sin(\pi f T_s / 2\beta) & 0 < f \leq \beta / T_s \\ T_s & \beta / T_s < f \leq 1/T_s \\ T_s \sin(\pi(f T_s - 1)/2\beta) & 1/T_s < (1+\beta)/T_s \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\beta = (L-N)/N$ 为扩展系数, T_s 为脉冲宽度。综上所述,可以得出基于 RRC 的预编码器,其编码矩阵元素构成为:

$$P_{i,k} = c_i e^{-j2\pi i k/N}$$

$$c_i = \frac{1}{T} P\left(\frac{i}{T}\right), 0 \leq k \leq N, 0 \leq i \leq L$$

4 仿真结果与分析

为了验证基于预编码降低 OFDM 系统峰值平均功率比的方法,本文仿真系统采用了如图 1 所示结构,采用 64QAM 调制进行仿真。为进一步精确表达 PAPR 的分布情况,在仿真中采用 4 倍过采样,共统计 63600 个 OFDM 符号 PAPR 的分布情况,同时对不同扩展长度下的 PAPR 分布特性作分析。

图 2 给出了采用扩展长度(extend length)为 8 得到的 PAPR 分布情况,在传统的 OFDM 系统中峰值平均功率比的最坏情况可以达到 17dB^[5],依据本仿真在传统的 OFDM 系统中出现峰均比为 17dB 的概率为 0.01%,而采用预编码的方法后概

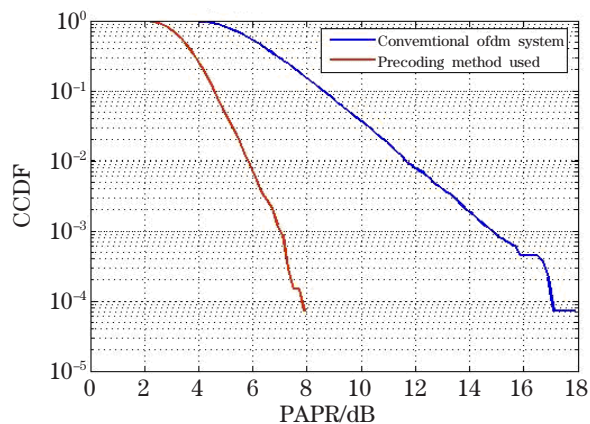


图 2 使用预编码方法降低 PAPR 的 CCDF 曲线

Fig.2 The CCDF curves of precoding method used to reduce PAPR

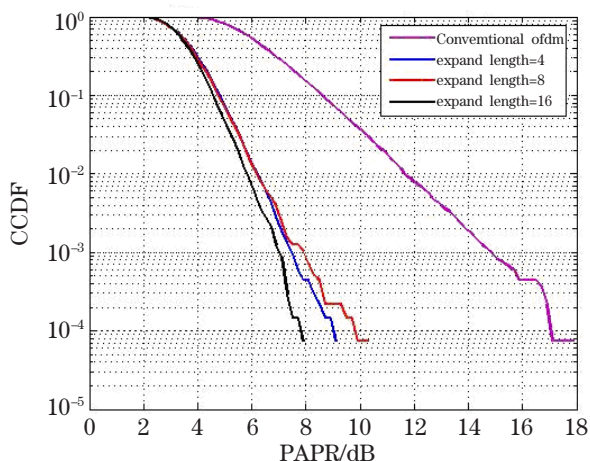


图 3 不同扩展长度下的 CCDF 曲线

Fig.3 CCDF curves with different expanding length

率对应的峰均比仅 7.9dB 左右,有将近 8.9dB 的改善。

图 3 给出了不同扩展长度下 PAPR 的分布情况,不同的扩展长度下,对峰均比的压缩有不同的性能,在实际系统实现时应该综合考虑 HPA 的线性工作范围,选择合适的扩展长度压缩峰均比。

考虑到改变 OFDM 信号的调制格式将影响到 OFDM 系统的性能,本文对采用 Precoding 方法降低 OFDM 系统 PAPR 的系统性能在 AWGN 信道、衰落信道下分别做了仿真。从图 4 可以看出,在低信噪比(<10dB)下,该方法与未采用峰均比抑制算法的性能相当;在高信噪比环境下,提出的算法对 OFDM 系统的性能有一定的改善作用。选用 ITU-R M.1225channel B6 径信道模型,最大多普勒频移为 92Hz,在采用 64QAM 调制方式的 OFDM 系统误码率与信噪比关系的仿真结果如图 5 所示。从仿真结果可以看出在衰落信道模型下,由于多径,时延,以及多普勒频移的作用,破坏了子载波的正交性,导致 OFDM 系统误码率的急剧

上升；在选用扩展长度为 8 的 precoding+OFDM 系统中,在衰落信道下对系统误码率有一定的改善作用。要大大提高 OFDM 系统抗多普勒效应必须施加合理的信道估计算法,以及分集接收等技术。

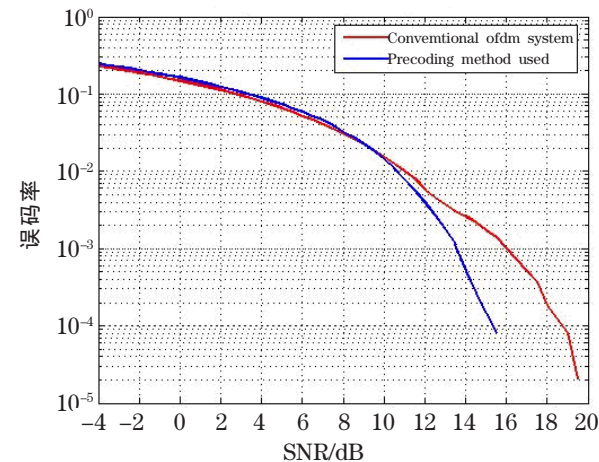


图 4 预编码方法在 AWGN 信道下的误码率性能曲线
Fig.4 The BER performance of proposed method under AWGN channel

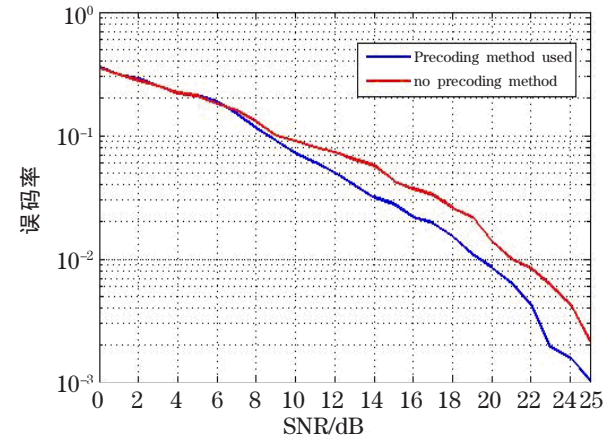


图 5 预编码方法在衰落信道下误码率性能曲线
Fig.5 The performance of proposed method under ITU-R-M channel

5 结 语

本文提出了一种简单有效的预编码方法解决 OFDM 中高峰均比的问题。通过调整 OFDM 系统中各个子载波的波形,使峰值出现在不同的采样时刻,由此避免高的峰均比的产生。基于上述原理,在频域上合成预编码矩阵,通过对频域数据的预编码来实现降低峰均比的目的。本文只对 64QAM 调制进行了讨论,预编码的方法对数字基带符号映射方式本身没有要求,该方法可以直接推广到其它基带数据映射方式(16QAM、QPSK 等)。

参 考 文 献

[1] Kenneth G. Paterson. Generalized reed-muller codes and power control in OFDM modulation [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2000, 46(1): 104-120.

[2] Tellambura C. Computation of the continuous-time PAR of an OFDM signal with BPSK subcarriers [J]. IEEE Co. mmunication Letters, 2001, 5(5): 185-187.

[3] Slimane Ben Slimane. Peak-to-average power ratio reduction of OFDM signals using Broadband pulse shaping, Proc[A]. IEEE VTC[C]. 2002, 889-893.

[4] Ben Slimane S. Performance of OFDM systems with time-limited waveforms over multipath radio channels [A]. IEEE Globecom'98[C]. Sydney, Australia, 1998, 12: 8-12.

[5] 张海滨. 正交频分复用的基本原理与关键技术. 北京. 国防工业出版社. 2006, 1.