

高功率放大器非线性失真联合抑制方法

胡 苏, 武 刚, 李少谦

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

【摘要】高功率放大器引入的非线性失真将导致带内信号失真、频谱扩展(邻道干扰)和误码率恶化。在剖析高功率放大器非线性输入输出特性的基础上,针对正交频分复用系统,分析了高峰平功率比问题和放大器预失真器对系统性能的影响,提出一种联合高功率放大器预失真和预留空子载波的无失真峰平功率比抑制方法。计算机仿真结果表明,所提方法在较低的输入信号功率回退条件下,能够取得较大的误码率性能改善。

关键词 非线性失真; 功率放大器; 预留子载波方法; 预失真

中图分类号 TN92

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.04.006

Joint Nonlinearity Reduction Method for High Power Amplifier

HU Su, WU Gang, and LI Shao-qian

(National Key Laboratory of Communication, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract Communication systems always suffer the in-band distortion, spectrum regrowth, and BER degradation since the nonlinear effect of high power amplifier (HPA). This paper proposes a new joint nonlinearity reduction method by combining the predistorter and tone reservation using null subcarriers (TRNS) method. Tone reservation method is used to reduce the peak-to-average power ratio of the transmitted signal, while predistorter is applied to extend the dynamic range of HPA. Simulation results show that the proposed method can improve the total performance, especially, under low input back-off (IBO).

Key words nonlinear distortion; power amplifiers; predistortion; tone reservation;

无线与微波通信系统中,放置于射频前段的高功率放大器(HPA)是引入通信链路非线性失真的主要器件。一方面,非线性失真对无线通信系统将产生诸多不良影响,如输出信号星座图的实部和虚部发生偏移、星座眼图的眼睛闭合、频谱扩展、产生邻道干扰并恶化误码率。因此,非线性失真将导致链路传输质量和传输数据速率下降,所产生的邻信干扰还会导致系统的频谱利用率下降^[1-2]。

另一方面,在正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)系统中,系统的输出是多个子信道信号的叠加,如果多个信号的相位一致,那么所得到的叠加信号的瞬时功率就会远远高于信号的平均功率。这就对发射机内放大器的线性度提出了很高的要求,否则会带来信号畸变,使信号频谱发生变化,从而导致各个子信道间的正交性遭到破坏,产生干扰,使系统的性能恶化^[3]。

克服高功率放大器的非线性影响,目前主要有

两种方法:一种是在发射机的基带发射端对数据进行编码和信号处理进行峰平功率比(peak-to-average power ratio, PAPR)抑制。大量抑制PAPR方案已被提出,如限幅法、编码法、压缩扩展法,子载波预留(tone reservation, TR)等。第二种方法是基于已知的高功率放大器的输入输出特性进行预失真(predistortion)处理。预失真方法的非线性传递函数与高功率放大器的非线性传递函数正好相反,从而使整个系统的传递函数为线性函数。此外,预失真器通过增加初始信号的功率来克服高功率放大器的增益压缩。

在降低放大器非线性影响的过程中,往往对PAPR抑制方法或者高功率放大器预失真器进行单一的考虑,而没有结合两者的优点对系统进行联合优化。文献[4]提出一种高功率放大器预失真器结合部分传输序列(partial transmit sequences, PTS)方法,但由于其局限性,该方法不能达到预期的PAPR降低

效果,进而影响系统性能。文献[5]提出一种结合传统TR方法和预失真器的方法,在传统TR方法中,需要额外的子载波产生峰值抵消信号,所以该方法对系统的带宽效率有所降低。文献[6-8]中,提出了一种空子载波预留(TRNS)方法用于OFDM信号的PAPR抑制。该方法利用部分空子载波来产生峰值抵消信号,对信号的带宽效率没有影响,并且不会对发送信号引入非线性失真。文章结合仿真及分析结果,对TRNS抑制方法中的空子载波数量、位置等关键参量进行了针对性研究。因此,本文在非线性和放大器预失真器的基础上,结合TRNS方法的优点进一步提出联合预失真和TRNS方法的峰平功率比抑制方法,以克服高功率放大器在OFDM系统中发射端的非线性失真影响。考虑到下一代无线城域网标准IEEE 802.16d/e,即引起较多关注的WiMAX(worldwide interoperability for microwave access,全球互操作微波接入)技术,仿真和分析都是基于标准IEEE802.16d-2004^[9]进行的。

1 联合预失真和TRNS的非线性抑制方法

1.1 高功率放大器数学模型

假设 $s(t)$ 定义为输入信号,经过放大器后输出信号 $u(t)$ 可以表示为:

$$u(t) = s(t)G[|s(t)|] \quad (1)$$

其中放大器增益为:

$$G[|s(t)|] = \frac{A[|s(t)|]\exp[j\phi(|s(t)|)]}{|s(t)|} \quad (2)$$

式中 $A[\cdot]$ 和 $\phi[\cdot]$ 分别表示高功率放大器对输入信号的幅度增益函数和相位函数。

为了简化分析,选取一种典型的高功率放大器数学模型——固态功率放大器(solid state power amplifier, SSPA)Rapp模型,其输入信号与输出信号关系为^[9]:

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{(1+(V_{\text{in}}/V_{\text{sat}})^{2p})^{1/2p}} \quad (3)$$

式中 V_{in} 和 V_{out} 分别表示信号输入和输出电压; V_{sat} 表示放大器饱和输出电压;参数 p 为放大器平滑系数。由文献[10]可知,对于Rapp放大器模型而言,输入信号频率在10 GHz以下, $p=2$ 有较好的近似,所以在仿真过程中选用 $p=2$ 。从式(3)可以看到,Rapp模型仅仅改变输入信号的幅度特性,并没有改变输入信号相位特性,放大器幅度-幅度(AM-AM)

特性曲线如图1所示。

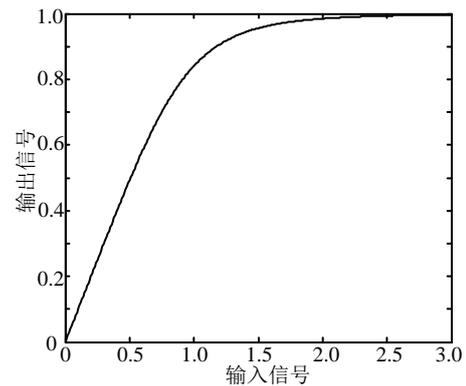


图1 高功率放大器Rapp模型AM-AM关系

为了分析高功率非线性放大器对WiMAX信号的影响,定义输入信号功率回馈(IBO)为:

$$\text{IBO} = 10 \lg \frac{P_{\text{max,In}}}{P_{\text{ave,In}}} \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

式中 $P_{\text{max,In}}$ 为输入信号最大功率; $P_{\text{ave,In}}$ 为输入信号平均功率。

1.2 高功率放大器预失真方法

高功率放大器预失真方法根据高功率放大器对不同输入信号的输入响应特性进行相应的信号补偿。根据Rapp高功率放大器模型式(3),预失真方法的幅度-幅度(AM-AM)映射函数和幅度-相位(AM-PM)映射函数可分别表示为:

$$\begin{cases} r(t) = \begin{cases} \frac{p(t)}{\sqrt{1 - \left(\frac{p(t)}{A_0}\right)^2}} & 0 \leq p(t) \leq A_0 \\ r(A_0) & p(t) > A_0 \end{cases} \\ \theta(t) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知,输入信号通过预失真器非线性补偿以后,高功率放大器线性区域得到了扩展。输入信号进行预失真处理后,能够部分抵消高功率放大器非线性特性的影响。

1.3 TRNS方法

假设原有OFDM信号时域采样点 $\mathbf{X} = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]$,采用峰值抵消时域信号 $\mathbf{C} = [C_0, C_1, \dots, C_{N-1}]$,则根据OFDM调制后时域信号得到的新的复合信号为:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{X} + \mathbf{C} = \text{IDFT}(\mathbf{x} + \mathbf{c}) \quad (6)$$

式中 $\mathbf{x} = [x_0, x_1, \dots, x_{N-1}]$ 为调制前发射信号矢量; $\mathbf{c} = [c_0, c_1, \dots, c_{N-1}]$ 为预留空子载波矢量,其中空子载波如图2所示^[9]。

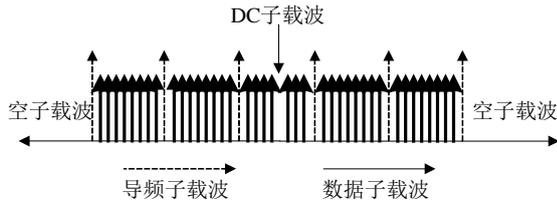


图2 WiMAX发射信号结构图

在空子载波预留方法中, x 和 c 不能同时都为空子载波, 有:

$$x_k + c_k = \begin{cases} x_k & k \in U^c \\ c_k & k \in U \end{cases} \quad (7)$$

式中 U^c 表示数据子载波序列; U 表示预留空子载波序列。因为所有接收端符号解调过程均在DFT以后, 对信号进行子载波逐一解调, 预留的子载波在接收端可以被直接丢弃, 且不会带来任何系统信号损失, 所以空子载波预留方法是一种无失真的PAPR降低方法^[6-8]。

1.4 联合预失真和TRNS的抑制方法

高功率放大器预失真方法仅把饱和点以下的AM/AM特性线性化, 没有大幅度增加动态范围, 而PAPR降低方法可降低输入信号的动态范围。在众多的PAPR降低方法中, 只有少数的方法能对基带信号不引入非线性失真, 其中包括TRNS方法。根据高功率放大器预失真方法和TRNS无失真PAPR抑制方法的优点, 提出联合两者共同优化系统性能, 结构示意图如图3所示。

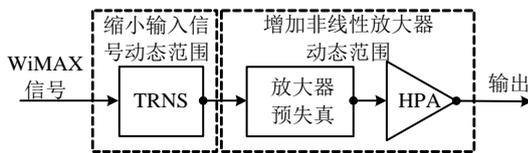


图3 联合预失真和TRNS的PAPR抑制方法示意图

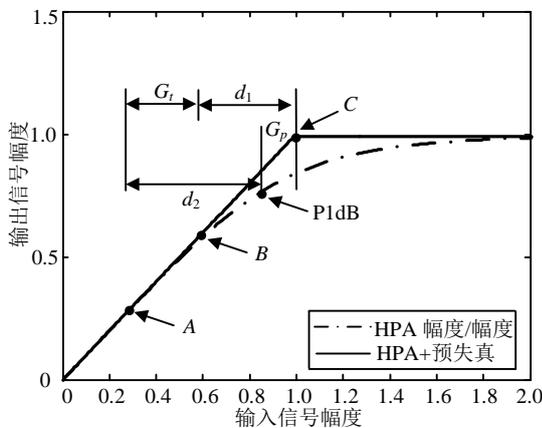


图4 高功率放大器动态范围及系统增益

为了分析联合预失真和TRNS的非线性失真抑

制方法, 高功率放大器动态范围和系统增益示意图如图4所示。在没有HPA预失真器的情况下, 发送信号平均功率位于点A, 且放大器动态范围为 d_2 (平均功率到P1dB压缩点)。从图中可看到, 在没有HPA预失真器和PAPR抑制方法的前提下, 发送信号的线性要求导致发送信号平均功率非常低, HPA效率也相应降低。在使用HPA预失真器情况下, 放大器饱和点从原来的P1dB压缩点延伸到C点, 因此HPA预失真器线性补偿带来了 G_p 的系统增益。考虑到TRNS方法能够降低发送信号PAPR, 则经过PAPR抑制后发送信号的动态范围降低为 d_1 , 因此TRNS方法的PAPR抑制效果取得 G_t 的性能增益。通常来说, 对于给定的高功率放大器饱和点是固定的, 在满足发送信号线性条件下, 发送信号平均功率越大, HPA效率越高。

2 计算机仿真

通过Matlab[®]的Simulink[®]系统仿真软件对TRNS方法、联合预失真的TRNS方法进行了链路仿真, 对两者在不同的输入IBO参数下进行比较研究。系统仿真中采用高功率放大器, OFDM系统仿真参数如表1所示。

表1 OFDM系统仿真参数

参数	参数数值
子载波数目/个	256
数据子载波数目/个	192
空子载波预留数目/个	20
带宽/MHz	8

联合预失真的TRNS方法与TRNS方法和预失真器仿真结果比较分别如图5和图6所示。观察图5可以发现: 联合预失真和TRNS方法与TRNS方法相比, 在IBO=3 dB, BER=10⁻³情况下, 联合优化方法比TRNS方法优化超过了5 dB增益; 在IBO=6 dB, BER=10⁻³情况下, 联合预失真和TRNS的PAPR抑制方法仍然有1 dB增益。图6表明了联合预失真和TRNS方法与预失真方法BER性能比较。从仿真结果可以看到, 在IBO=3 dB, BER=10⁻³情况下, 联合优化方法比预失真方法性能增益也远大于5 dB; 在IBO=6 dB, BER=10⁻³情况下仍接近1.5 dB增益。

通过观察仿真结果还可以发现, 随着IBO的不断减小, BER在相同的信噪比条件下不断恶化。这是由于IBO不断减小使放大器线性动态范围减小, 信号落入非线性区域的机会也逐渐增大, 输入信号

的非线性失真增加,且导致BER急剧上升。

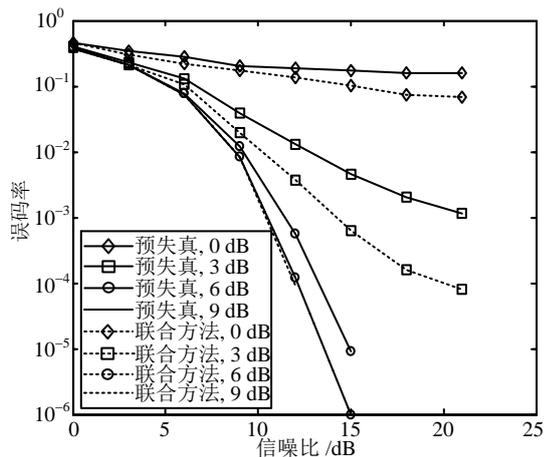


图5 联合预失真和TRNS与TRNS方法BER性能比较

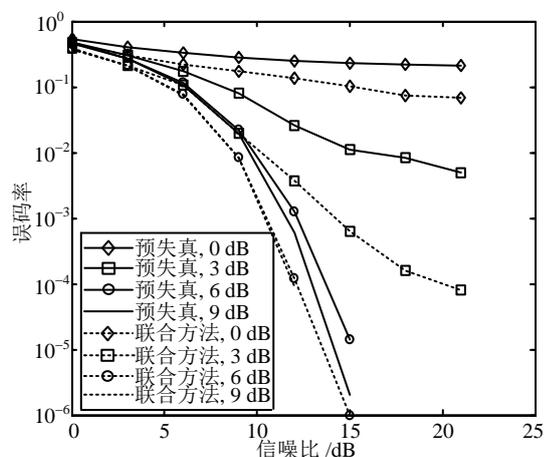


图6 联合预失真和TRNS方法与预失真BER性能比较

3 结论

本文首先分析了高功率放大器的非线性特性以及非线性对WiMAX信号所带来的系统影响,通过分析两种降低高功率放大器非线性的方法(预失真、PAPR抑制方法)的基础上,结合两者各自优点提出了联合预失真和TRNS的PAPR抑制方法。在选取Rapp放大器模型作为研究重点基础上,对该模型下

的联合优化方法系统性能进行了研究。仿真结果表明,联合预失真和TRNS的PAPR抑制方法能够提高系统性能,特别是在低IBO情况下,系统性能大幅度提高。

参考文献

- [1] RAAB F H, ASBECK P, CRIPPS S. Power amplifier and transmitters for RF and microwave[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2002, 50(3): 814-826.
- [2] LIN F L, CHEN S F, CHUANG H R. Effects of RF-circuit nonlinear distortion on digitally modulated signals in wireless communications[J]. Microwave Journal, 2000, 43(9): 126-138.
- [3] RICHARD D J, RAMJEE P, RASAD R. OFDM for wireless multimedia communications(Hardcover)[M]. [S.l.]: Artech House, 2000.
- [4] RRU H G, HOA T P, PARK J S. Improvement of power efficiency of HPA by the PAPR reduction and predistortion[J]. IEEE Trans Consumer Electronics, 2004, 50(1): 119-124.
- [5] SEZGINER S, SARI H. OFDM peak power reduction with simple amplitude predistortion[J]. IEEE Commun Letters, 2006, 10(2): 65-67.
- [6] HU S, WU G, GUAN Y L, et al. Analysis of tone reservation method for WiMAX system[C]//IEEE Intl Symp on Communications and Information Technologies (ISCIT). Bangkok: IEEE Press, 2006: 498-502.
- [7] HU S, WU G, GUAN Y L, et al. Development and Performance Evaluation of Mobile WiMAX Testbed[C]//IEEE Mobile WiMAX Symposium. Orlando: IEEE Press, 2007: 104-107.
- [8] HU S, WU G, LI S, et al. Effectiveness of tone-reservation using null subcarriers (TR-NS) in WiMAX systems[C]//Intl Conf Commun Circuits, and System. Japan: IEEE Press, 2007: 296-300.
- [9] IEEE. Air interface for fixed broadband wireless access systems[S]. IEEE Standard 802.16d-2004, IEEE Press, 2004.
- [10] HEUNG G R, JU S P, JIN S P. Threshold IBO of HPA in the predistorted OFDM communication system[J]. IEEE Trans Broadcasting, 2004, 50(4): 425-428.

编辑 张俊