一种具有普适性的功放线性化预失真方案*

黄 圣, 胡泽鑫, 龚文斌
(1. 上海微小卫星工程中心, 上海 200050; 2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘 要: 为解决功率放大器的非线性问题,提高功放效率,提出了一种能够应用于多种类型功放的间接结构多项式数字基带预失真方案。采取间接预失真结构规避了功放的辨识过程,选择记忆多项式模型作为预失真器能够线性化多种类型的功放,同时采用改进的抑制牛顿算法减少了参数的迭代次数和运算量。以 64QAM 信号作为输入,对几种典型的功放模型进行数字预失真处理,通过 MATLAB 仿真分析预失真前后信号的功率谱变化以及 ACPR 值的改变,表明该方案能够取得比较理想的预失真效果,同时证明了此预失真方案具有一定的普适性。

关键词: 间接预失真结构; 记忆多项式模型; 最小二乘算法; 牛顿法
中图分类号: TN911.72 **文献标志码**: A **文章编号**: 1001-3695(2012)05-1854-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.05.067

Robust predistortion proposal for power amplifier linearization

HUANG Sheng, HU Ze-xin, GONG Wen-bin
(1. *Shanghai Engineering Center for Micro-satellites*, *Shanghai* 200050, *China*; 2. *Shanghai Institute of Microsystem & Information Technology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai* 200050, *China*)

Abstract: To linearize power amplifiers and improve efficiency, this paper found a robust predistortion proposal that could be used to several types of PAs. Using the indirect predistortion structure, it does not need to consider the PA's identification. Taking the memory polynomial model as predistorter, it could linearize more than one certain PA. And the improved Newton's method has less computation of polynomial coefficients. Some simulations were proceeded using 64-QAM signals and studies were done on the changes of power spectral density (PSD for short) and adjacent channel ratio (ACPR for short) before and after predistortion. The results show that this proposal can get good performances, proving its robust as well.

Key words: indirect predistortion structure; memory polynomial model; Least-square algorithm; Newton's method

功率放大器是通信系统中不可或缺的组成部件,由于构成放大器的各种有源器件的特性都是非线性的,所以功放总是会表现出一定程度的非线性。传统的恒包络调制可以工作于功率放大器的临近饱和区并有较高的效率,但是频谱利用率低。现代通信系统中广泛采用的 QAM、WCDMA 和 OFDM 等频谱利用率更高的非恒包络调制方式,对放大器提出了很高的线性度要求。

线性化技术有前馈法、反馈法和预失真等方法。前馈法能够工作于较宽的带宽,但系统复杂度较大,成本较高;反馈法结构简单,但由于反馈环路的存在,只能工作于窄带系统。近年来,随着数字信号处理器(DSP)技术飞速发展,数字预失真成为构建高效线性功率放大器(HPA)中最有前途的一项技术。

对于功放的建模,国内外学者已经做了大量的研究工作,提出了多种可用的行为模型。常常采用 Saleh 模型[1]、Rapp 模型和幂级数模型来建模无记忆功放,用 Volterra 模型[2]、Wiener 模型[3]、Hammerstein 模型[4]以及记忆多项式模型[5]等来对带记忆功放进行建模。

通过对实际功放的辨识可以得到其模型参数,从而采用不同的预失真器和迭代算法对输入信号进行预失真仿真处理。目前很多预失真设计都是基于单一的非记忆或记忆功放模型,普适性较差。基于此点考虑,本文提出了一种能够应用于多种类型功放的间接结构多项式预失真方案。

1 记忆多项式模型

在所有的记忆非线性模型中,Volterra 级数模型最为准确。它克服了幂级数的不足,引入了记忆效应,是分析非线性记忆系统最经典的方法。离散系统中,无限、因果 Volterra 级数模型表达式如下:

$$y(n)=\sum_{q_1=0}^{\infty}h_{q_1}x(n-q_1)+\sum_{q_1=0}^{\infty}\sum_{q_2=0}^{\infty}h_{q_1q_2}x(n-q_1)x(n-q_2)+\sum_{q_1=0}^{\infty}\sum_{q_2=0}^{\infty}\sum_{q_3=0}^{\infty}h_{q_1q_2q_3}x(n-q_1)x(n-q_2)x(n-q_3)+\sum_{q_1=0}^{\infty}\sum_{q_2=0}^{\infty}\cdots\sum_{q_i=0}^{\infty}h_{q_1q_2\cdots q_i}x(n-q_1)x(n-q_2)\cdots x(n-q_i)+\cdots \quad (1)$$

由式(1)可以看出,Volterra 级数的系数个数随着记忆深度和非线性阶数呈指数增长,使得 Volterra 级数模型的硬件实现非常困难。

在截短的 Volterra 级数中,如果仅考虑其对角项,参数数量将比 Volterra 级数少很多。考虑这样一个例子,假设只包含

收稿日期: 2011-08-18; **修回日期**: 2011-10-06 **基金项目**: 新泰研究与发展基金资助项目(09XXTA1001);上海市自然科学基金资助项目(10ZR1429100)

作者简介: 黄圣(1987-),男,湖北黄冈人,硕士研究生,主要研究方向为高效线性功率放大器中的数字信号处理(kemiko010@gmail.com);胡泽鑫(1983-),男,湖南长沙人,博士研究生,主要研究方向为功率放大器的线性化处理技术;龚文斌(1975-),男,浙江玉环人,研究员,博士,主要研究方向为相控阵天线与卫星通信技术研究.

线性和立方项的系统的基带输入为 $x(n)$,输出为 $z(n)$,则式(1)的 Volterra 级数变为

$$z(n)=\sum_{q_1=0}^{Q}h_1(q_1)x(n-q_1)+\sum_{q_1,q_2,q_3=0}^{Q}h_3(q_1,q_2,q_3)x(n-q_1)x(n-q_2)x(n-q_3) \tag{2}$$

其中:线性项和三次项系数分别为 $\{h_1(q_1)\}_{q_1=0}^{Q}$ 和 $\{h_3(q_1,q_2,q_3)\}_{q_1,q_2,q_3=0}^{Q}$,这些系数共同决定了非线性系统的特性。如果 $Q=0$,式(2)就变为

$$z(n)=h_1(0)x(n)+h_3(0,0,0)x(n)|x(n)|^2 \tag{3}$$

这是一个无记忆非线性系统。如果对 $q_1=q_2=q_3$ 外的其他情况有 $h_3(q_1,q_2,q_3)$ 都为零,则式(3)变为

$$z(n)=\sum_{q=0}^{Q}[h_1(q)x(n-q)+h_3(q,q,\cdots,q)x(n-q)|x(n-q)|^2] \tag{4}$$

式(4)称为有记忆多项式,可以看成是 Volterra 级数和无记忆非线性之间的一种折中形式。这种有记忆多项式既反映了记忆特性,同时系数又不多。若将式(4)写成通用的形式,$h_k(q,q,\cdots,q)$ 改成 a_{kq},则记忆多项式可表述为

$$y(n)=\sum_{\substack{k=1\\k=\text{odd}}}^{K}\sum_{q=0}^{Q}a_{pq}x(n-q)|x(n-q)|^{k-1} \tag{5}$$

其中:K 为非线性阶数,一般取奇数;Q 为记忆深度。

记忆多项式模型的优势在于既能描述 HPA 的记忆效应,又能把系数的数目限制在相对较小的数量级,同时忽略了所有不同时刻输入信号的交叉项。在 Volterra 级数模型中,非线性阶数为 K 的系数数目为 $(1+Q)^K$;而对于记忆多项式,系数数目降低为 $(1+Q)(1+K)/2$,运算复杂度大大降低。

2　间接预失真结构

传统的直接预失真结构首先需要对放大器模型进行辨识,然后再进行预失真模块的自适应运算,其缺点在于需要更多的运算量,并且两次辨识降低了预失真的效果。

间接预失真结构[6]不需要辨识放大器模型,而是辨识功放的逆模型,即预失真训练网络,然后将训练网络的参数直接复制到具有相同结构的预失真器中,因而更为简单通用。

如图 1 所示,G 为功放的线性化增益,预失真器和预失真训练网络具有相同的结构。对于功放的一组输入/输出 $z(n)$、$y(n)$,$y(n)=F(z(n))$,$F(x)$ 为功放模块的传递函数,$y(n)$ 为衰减后经过预失真训练的网络;$\hat{z}(n)=P(y(n)/G)$,$P(x)$ 为训练网络的传递函数,利用 $z(n)$ 和 $\hat{z}(n)$ 的差值进行自适应运算,收敛后 $\hat{z}(n)\approx z(n)$;然后将训练网络的参数复制到预失真器中,有 $z(n)=P(x(n))$,可得 $y(n)=x(n)/G$,从而达到线性化的目的。

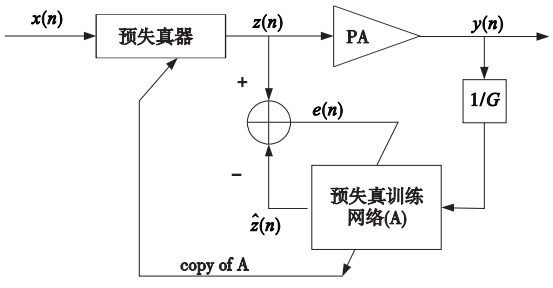

图1　间接预失真结构

3　多项式系数求解

如前所述,记忆多项式模型的表达式如下:

$$z(n)=\sum_{\substack{k=1\\k=\text{odd}}}^{K}\sum_{q=0}^{Q}a_{pq}y(n-q)|y(n-q)|^{k-1} \tag{6}$$

如果定义式(7):

$$u_{kq}(n)=\frac{y(n-q)}{G}\left|\frac{y(n-q)}{G}\right|^{k-1} \tag{7}$$

将式(6)写为如下矩阵形式:

$$\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{a} \tag{8}$$

其中,$\boldsymbol{U}$ 为输入数据构成的矩阵,$\boldsymbol{a}$ 为因子个数为 $K\times(Q+1)$ 的系数向量,$\boldsymbol{Z}$ 为 $N\times1$ 的向量:

$$\boldsymbol{U}=[u_{10},u_{20},\cdots,u_{K0},\cdots,u_{1Q},\cdots,u_{KQ}]$$
$$u_{kq}=[u_{kq}(0),u_{kq}(1),\cdots,u_{kq}(N-1)]^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{a}=[a_{10},\cdots,a_{K0},a_{11},\cdots,a_{K1},\cdots,a_{KQ}]^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{Z}=[z(0),z(1),\cdots,z(N-1)]^{\mathrm{T}}$$

利用 LS 算法求解式(8)的系数,可得

$$\hat{\boldsymbol{a}}=(\boldsymbol{U}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{U})^{-1}\boldsymbol{U}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{Z} \tag{9}$$

其中:$(.)^{\mathrm{H}}$ 为复共轭转置。

多项式预失真器的系数可以通过上文中的 LS 算法进行求解,采用文献[7]中介绍的抑制牛顿法来进行参数更新。更新式为

$$\boldsymbol{a}(k+1)=\boldsymbol{a}(k)+\mu(\boldsymbol{U}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{U})^{-1}\boldsymbol{U}^{H}e(k) \tag{10}$$

其中:μ 为迭代步长,$e(k)=\boldsymbol{z}_k-\hat{\boldsymbol{z}}_k$ 为第 k 次迭代误差。经过多次迭代,参数能够收敛到最优值。

当内循环迭代使得预失真训练网络达到收敛后,为了提高抑制牛顿算法的精度,在把参数复制给预失真器后,利用新得到的 $z(n)$ 和 $y(n)$,重新进行迭代,并在外循环中加入判断语句,以预失真系统的输入/输出求得的均方误差 MSE 作为衡量标准,当 MSE 下降到某一门限时,即可终止迭代过程,以减少运算量,加快收敛速度。均方误差式如下:

$$\mathrm{MSE}=10\lg\frac{\sum_{n=1}^{N}|x(n)-y(n)/G|^2}{\sum_{n=1}^{N}|x(n)|^2} \tag{11}$$

MSE 可以用来衡量两个信号之间的误差大小,单位为 dB。

4　仿真

本仿真中只考虑功率放大器的非线性影响,预失真器与功率放大器之间的 A/D 变换器和上下变频器等部分不予考虑,当做线性结构处理,以简化其复杂度。

输入信号采用 64QAM 调制,8 倍上采样,并通过提升因子为 0.5 的升余弦滤波脉冲成形,信号的包络最大值为 1。预失真器采用记忆多项式模型,$K=5$,$Q=2$,采用间接预失真结构进行仿真,同时采用无记忆多项式进行预失真处理,以比较线性化效果。

下面将分别对四种功放模型进行预失真处理,功放的参数均是从实际功放中提取出来的。

4.1　Saleh 模型

对于无记忆的功率放大器,Saleh 模型能够很好地表征行波管高频放大器(traveling wave tube amplifier,TWTA)的 AM/AM 和 AM/PM 特性,其表达式分别为

$$A(r(t))=\alpha_1 r(t)/(1+\beta_1 r^2(t))$$
$$\Phi(r(t))=\alpha_2 r^2(t)/(1+\beta_2 r^2(t)) \tag{12}$$

其中:$r(t)$ 为信号幅值,本文选取 $\alpha_1 = 2.1587, \beta_1 = 1.1517$, $\alpha_2 = 4.033, \beta_2 = 9.104$。预失真得到的功率谱密度(PSD)如图 2 所示。由图 2 可见,输入信号经过放大器造成了大约 20 dB 的带外频谱再生,经过预失真得到的频谱曲线和输入的谱线几乎重合。由于功放无记忆,无记忆和记忆预失真都能取得很好的效果。

4.2 Wiener 模型

Wiener 模型是由一个线性时不变(LTI)系统级联一个无记忆非线性系统(NL),可用下式描述:

$$u(n) = \sum_{q=0}^{Q} h_q x(n-q)$$

$$y(n) = \sum_{k=1}^{K} c_k u(n) |u(n)|^{k-1} \tag{13}$$

这里选取 $Q = 2, h_q = [0.7692 \quad 0.1538 \quad 0.0769]$,非线性系统采用 4.1 节中的 Saleh 模型。预失真得到的功率谱密度(PSD)如图 3 所示。

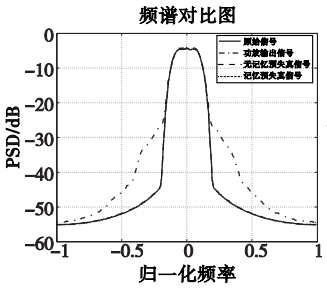

图2 PA为Saleh模型时的频谱图

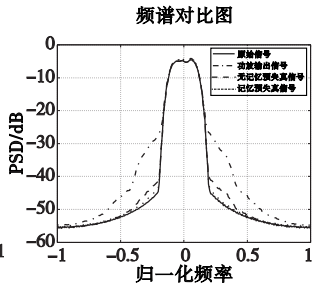

图3 PA为Wiener模型时的频谱图

由图 3 可见,记忆多项式预失真器能够取得很好的效果,而无记忆多项式的预失真效果稍差,有 2 dB 的恶化。

4.3 记忆多项式模型

记忆多项式模型如前所述,这里取 $K = 5, Q = 2$,系数为

$a_{10} = 1.0513 + 0.0904j, a_{30} = -0.0542 - 0.29j, a_{50} = -0.9657 - 0.7028j$

$a_{11} = -0.068 - 0.0023j, a_{31} = 0.2234 + 0.2317j, a_{51} = -0.2451 - 0.3735j$

$a_{12} = 0.0289 - 0.0054j, a_{32} = -0.0621 - 0.0932j, a_{52} = 0.1229 + 0.1508j$

预失真得到的功率谱密度(PSD)如图 4 所示。由图 4 可知,记忆多项式预失真器仍然能够取得很好的效果,而非记忆预失真的效果随着记忆效应的增强进一步恶化,为 6 dB。

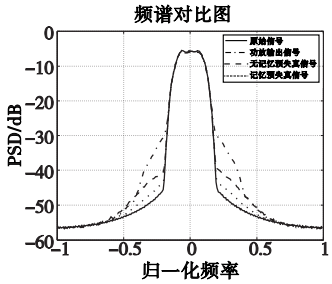

图4 PA为记忆多项式模型时的频谱图

4.4 Wiener-Hammerstein 模型

如果在 Wiener 模型后续接一个 LTI 系统,就可以得到 Wiener-Hammerstein 模型,简称 W-H 模型。W-H 模型通常用于卫星通信信道,其为了达到最大的功率效率,功放往往工作于临近饱和区域。W-H 模型可以用如图 5 所示框图表示。

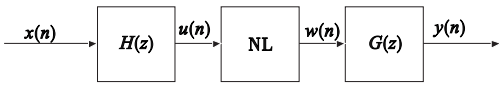

图5 W-H模型结构

其中,$w(n) = \sum_{\substack{k=1 \\ \text{odd}}}^{K} b_k v(n) |v(n)|^{k-1}$,参数选取如下:

$$b_1 = 1.0108 + 0.0858j$$

$$b_3 = 0.0879 - 0.1583j$$

$$b_5 = -1.0992 - 0.889j$$

$$H(z) = \frac{1 + 0.5z^{-2}}{1 - 0.2z^{-1}}, G(z) = \frac{1 - 0.1z^{-2}}{1 - 0.4z^{-1}}$$

预失真得到的功率谱密度(PSD)如图 6 所示。W-H 模型具有很强的记忆效应,由图 6 可见,无记忆预失真的效果非常差,误差为 13 dB,这时必须考虑记忆效应;而记忆多项式预失真模型仍然能够取得理想的效果,与原始数据仅有不到 1 dB 的误差。

从预失真系统输入/输出信号的 MSE 迭代变化曲线分析得到图 7。

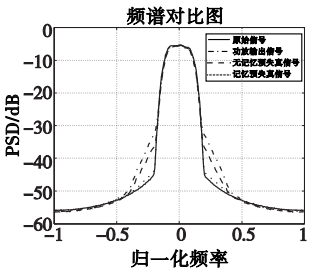

图6 PA为W-H模型时的频谱图

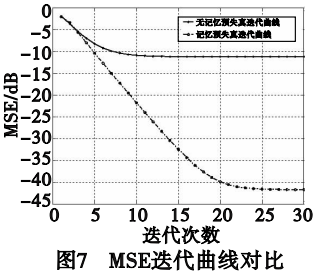

图7 MSE迭代曲线对比

由图 7 可知,经过 30 次外循环的迭代运算,无记忆预失真处理后得到的 MSE 大约为 -11 dB,远远大于记忆多项式预失真收敛到的 -41.5 dB。

4.5 结果分析

相邻信道功率比(ACPR)是表征相邻信道干扰情况最常使用的参数指标:

$$\mathrm{ACPR} = 10\log_{10}\frac{\int_{f_3}^{f_4} s(f)\,\mathrm{d}f}{\int_{f_1}^{f_2} s(f)\,\mathrm{d}f} \tag{14}$$

其中:$s(f)$ 为功率谱密度,$[f_1, f_2]$ 为传输信道,$[f_3, f_4]$ 为相邻信道。

ACPR 对于宽带信号(如 WCDMA 等)是至关重要的,因为宽带调制在调制载波中产生紧密相邻的频谱成分,这些成分的互调会导致频谱扩展。功放的非线性将使得扩展频谱进入相邻信道而造成干扰。

总结上述四幅仿真图可以得到 ACPR 对比如表 1 所示。

表 1 预失真前后 ACPR 对比

功放模型/信号类型	原始信号/dB	功放输出信号/dB	无记忆预失真信号/dB	记忆预失真信号/dB
Saleh 模型	-44.62	-26.03	-43.96	-43.96
Wiener 模型	-44.62	-25	-40.28	-43.51
多项式模型	-44.62	-25.6	-38.46	-43.7
W-H 模型	-44.62	-28.08	-32.31	-44.57

由表 1 可见,对于 Saleh 模型,采取无记忆的预失真方法就能够得到很好的预失真效果;而对于有记忆的功放,带记忆的预失真方法始终比无记忆预失真有着更好的效果,并且随着记忆强度的增加,无记忆预失真方法的效果越来越差,从相差 3 dB 恶化至 12 dB,而记忆多项式模型始终能够取得理想的线性化效果。

(下转第 1859 页)

(上接第 1856 页)

5 结束语

本文通过将记忆多项式模型和间接预失真结构二者相结合,并采取一种改进的抑制牛顿算法进行参数迭代,从而提出了一种新的预失真方案。通过对 Saleh、Wiener、记忆多项式和 W-H 模型进行数字预失真仿真,分析了预失真前后的频谱变化和 ACPR 值的改变,表明了该预失真方案能够线性化多种类型的功放,具有更小的运算量,并能取得很好的效果,从而证明了该方案具有一定的普适性。

参考文献:

[1] SALEH A. Frequency-independent and frequency-dependent nonlinear models of TWT amplifiers[J]. IEEE Trans on Communications, 1981,29(11):1715-1720.

[2] 姚应磊. 功率放大器的基带预失真方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2010.

[3] 钱叶青,刘富强. Wiener 功率放大器的简化预失真方法[J]. 通信学报,2007,28(10):55-59.

[4] 曹新容,黄联芬,赵毅峰. 一种基于 Hammerstein 模型的数字预失真算法[J]. 厦门大学学报,2009,48(1):47-50.

[5] BARHIMI A, MIRZAKUCHAIKI S, KARAMI S. Power amplifiers linearization based on digital predistortion with memory effects[C]// Proc of the 2nd International Conference on Computer and Electrical Engineering. 2009:26-29.

[6] 钱业青. 一种高效的用于 RF 功率放大器线性化的自适应预失真结构[J]. 通信学报,2006,27(5):35-40.

[7] MORGAN D R, MA Zheng-xiang, KIM J, *et al*. A generalized memory for digital polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2006,54(10):3852-3860.