

一种新的分数阶记忆多项式预失真器

李波 葛建华 王勇

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文针对由记忆多项式设计的功率放大器预失真系统, 提出了一种新的分数阶记忆多项式预失真器。提出预失真多项式是在常用记忆多项式基础上, 通过去掉偶数阶项增加分数阶项以提高线性化性能。文中给出了分数阶记忆多项式的表达式, 并给出了相应的系数估计算法。仿真分析表明, 针对 Wiener-Hammerstein 和记忆多项式模型的功率放大器, 在两种典型记忆多项式预失真的基础上可以分别得到 10 dB 和 8 dB 的带外谱抑制增益。相应的 FPGA 实现表明该预失真多项式总体硬件资源增加的代价并不高, 易于在实际系统中应用。

关键词: 正交频分复用; 功率放大器; 预失真; 记忆多项式

中图分类号: TN919.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)08-1961-04

A Novel Fractional Order Memory Polynomial Predistorter

Li Bo Ge Jian-hua Wang Yong

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: For the high power amplifier predistorter using memory polynomial, a novel fractional order memory polynomial predistorter is proposed. The proposed predistortion polynomial is achieved by changing the even order term to fractional order term in the memory polynomial predistorter to improve the linearization performance. Computer simulations show that the proposed polynomial predistorter can get 10 dB and 8 dB out-band suppression gain based on two typical polynomial predistorters for Wiener-Hammerstein and memory polynomial power amplifier. FPGA realization shows that its increasing cost of hardware resources is acceptable, so easiness to implemented.

Key words: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); Power Amplifier (PA); Predistortion; Memory polynomial

1 引言

在频谱资源日益紧张的今天, 现代通信系统趋于采用比恒定包络调制方式具有更高频谱效率的非恒定包络调制方式^[1,2]。然而非恒定包络调制方式易受功率放大器非线性效应的影响, 产生带内失真和带外谱扩散。带内失真出现互调分量, 降低系统性能; 带外谱扩散导致邻近信道干扰, 这个被无线电管理部门所严格监测控制^[3,4]。为了克服上述问题, 功率放大器需要增大输出回退, 从而效率大幅度降低^[5]。因此通过功率放大器线性化技术减少非线性效应的影响是非常有必要的^[6]。

近年来, 已经提出了许多功率放大器线性化技术, 如功率回退, 笛卡尔环路后馈, 前馈, 数字自适应预失真技术等; 在这些线性化技术中, 自适应数字预失真技术被认为是最有前景的功率放大器线性化技术^[7]。其基本思想是在功率放大器前串联一个

具有其逆特性的预失真器, 从而在功率放大器输出得到无失真的线性放大信号。在窄带传输系统中, 功率放大器的记忆效应是可以忽略的, 那么无记忆预失真就可以满足线性化要求。然而在宽带无线应用, 如 WCDMA, OFDM 系统中, 功率放大器的记忆效应却不能被忽略, 无记忆预失真的线性化效果通常并不能满足要求^[8]。

记忆预失真通常有基于查找表和基于多项式两类实现方法。查找表方法易于实现, 但是需要较长的收敛时间^[9], 并且需要大量存储单元^[10], 这也增加了芯片的成本。相比较多项式方法的线性化效果要优于查找表, 而且收敛速度快, 并且只需较少的存储单元, 因而被普遍使用^[11], 本文的研究也是针对多项式方法。

已有记忆多项式可以看作是 Volterra 级数的简化形式, 文献[8,12,13]给出了其不同表达形式。在这些多项式模型中, Ding 的鲁棒记忆多项式模型最为典型^[8]。为了进一步提高预失真性能, 本文基于 Ding 的记忆多项式模型, 提出了一种包含分数阶项的记

忆多项式模型, 分析表明通过增加分数阶项后, 预失真器的线性化效果要优于典型多项式模型。

2 记忆功率放大器模型

记忆功率放大器模型通常有 Wiener 模型, Hammerstein 模型, Wiener-Hammerstein 模型和 Memory Polynomial 模型^[8], 本文以较复杂的 Wiener-Hammerstein 模型和 Memory Polynomial 模型作为研究对象。

2.1 Wiener-Hammerstein 模型

图 1 示出了 Wiener-Hammerstein(W-H)模型的原理框图, 图中 $H(z)$ 和 $G(z)$ 分别表示两线性系统, $F(v)$ 表示非线性系统, $z(n)$ 和 $y(n)$ 分别为功率放大器的输入和输出。W-H 模型在卫星通信中被广泛应用。这里取

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

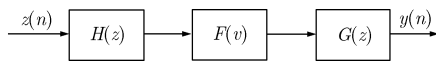


图 1 W-H 模型框图

非线性传递函数

$$w(n) = \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \text{odd}}}^K b_k v(n) |v(n)|^{k-1} \quad (2)$$

函数中 $v(n)$ 和 $w(n)$ 分别为非线性模块的输入和输出。对于系数有

$$\begin{aligned} b_1 &= 1.0108 + 0.0858j, \quad b_3 = 0.0879 - 0.1583j, \\ b_5 &= -1.0992 - 0.8891j \end{aligned} \quad (3)$$

系数是从实际的 AB 类功率放大器中提取的。

2.2 记忆多项式模型

对于记忆多项式模型有

$$y(n) = \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \text{odd}}}^K \sum_{q=0}^Q c_{kq} z(n-q) |z(n-q)|^{k-1}$$

函数中 $z(n)$ 和 $y(n)$ 分别为功率放大器器的输入和输出。对于系数有

$$\left. \begin{aligned} c_{10} &= 1.0513 + 0.0904j, \quad c_{30} = -0.0542 - 0.2900j \\ c_{50} &= -0.9657 - 0.7028j, \quad c_{11} = -0.0680 - 0.0023j \\ c_{31} &= 0.2234 + 0.2317j, \quad c_{51} = -0.2451 - 0.3735j \\ c_{12} &= 0.0289 - 0.0054j, \quad c_{32} = -0.0621 - 0.0932j \\ c_{52} &= 0.1229 + 0.1508j \end{aligned} \right\} (4)$$

该系数也是从实际的 AB 类功率放大器中提取的。

3 一种新的记忆多项式预失真器

3.1 功率放大器预失真原理

自适应数字预失真的原理框图如图 2 所示。信

号经调制后, 产生同向分量 I_n 和正交分量 Q_n 输入预失真器。预失真后的数据经数模转换, 低通滤波, 上变频, 功率放大器后送至天线。同时功率放大器的输出经耦合下变频, 低通滤波后, 再经模数转换和输入信号相比较用于预失真器的自适应。

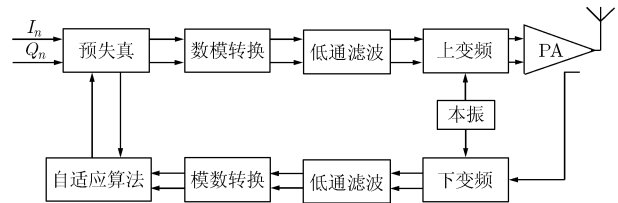


图 2 自适应基带预失真原理框图

预失真的目的是为了保证解调后系统的输出信号是系统所传输信号的线性放大, 因此如果预失真的特性用复函数 $F(\cdot)$ 表示, 功率放大器的特性用复函数 $A(\cdot)$ 等效, 则要求式(5)成立。

$$\begin{aligned} y(n) &= A(z(n), z(n-1), \dots) \\ &= A(F(x(n)), x(n-1), \dots) = G \cdot x(n) \end{aligned} \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 当 $G = 1$ 时, 理想预失真器的特性应为功率放大器非线性特性的函数逆。这里 G 为功率放大器的额定增益。

3.2 记忆多项式预失真技术

预失真中常用的记忆多项式模型有 3 种: Memory Polynomial (简写成 MP), Memory-Polynomial/Wiener model(简写成 MP/W), Generalized Memory Polynomial(简写成 GMP)。

(1)MP 模型 Ding 在文献[8]中提出了一种记忆多项式模型, 其表达式为

$$z_{MP}(n) = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} a_{km} x(n-m) |x(n-m)|^k \quad (6)$$

本文中 k 均指输入信号包络的阶数。文献[8]已证明该记忆多项式预失真模型对实际的功率放大器是非常有效的。

(2)MP/W 模型 文献[12]在 MP 的基础上引入交叉项, 其表达式为

$$\begin{aligned} z_{MPW}(n) &= \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} a_{km} x(n-m) |x(n-m)|^k \\ &+ \sum_{k=1}^{K-1} b_k x(n) \left[\sum_{m=0}^{M-1} c_m |x(n-m)| \right]^k \end{aligned} \quad (7)$$

文献[12]同时提出了一种估计该模型系数的方法。系数 a_{km} 和 b_k 使用最小二乘方法估计, 系数 c_m 通过牛顿迭代方法求得。然而, 由于式(7)是系数 c_m 的非线性函数, 因而易受系数初始值的影响导致收敛不稳定, 会收敛到局部最小值。因此该多项式虽然

理论上引入交叉项可以提高预失真的效果，但系数估计不稳定，在并没有很好的系数估计算法出现以前，并没有很好的实用性。

(3)GMP 模型 文献[13]提出了一种 GMP 模型，其表达式为

$$z_{\text{GMP}}(n) = \sum_{k \in K_a} \sum_{l \in L_a} a_{kl} x(n-l) |x(n-l)|^k + \sum_{k \in K_b} \sum_{l \in L_b} \sum_{m \in M_b} b_{klm} x(n-l) |x(n-l-m)|^k + \sum_{k \in K_c} \sum_{l \in L_c} \sum_{m \in M_c} c_{klm} x(n-l) |x(n-l+m)|^k \quad (8)$$

这里 K_a 和 L_a 表示当前输入信号和包络序列， K_b ， L_b 和 M_b 表示滞后输入信号和包络序列， K_c ， L_c 和 M_c 表示超前输入信号和包络序列。

3.3 一种新的记忆多项式预失真器

以上 3 种多项式，MP 最为直接，且系数估计稳定，MP/W 系数估计不够稳健，GMP 的表达式亦繁琐，从而系数估计运算量增大，且实现复杂度提高。本文在 MP 的基础上进行适当改进，去掉偶数项，引入分数阶项。这样虽然适当提高了实现的复杂度，但仿真表明，通过引入分数项后预失真的效果会进一步提高。本文提出了一种新的分数阶记忆多项式，其复杂度高于 MP，低于 MP/W 和 GMP，然而仿真表明，该多项式的线性化性能却是最优的。

分数阶多项式可以表示如下：

$$z_{\text{FMP}}(n) = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} a_{km} x(n-m) |x(n-m)|^{k+\text{mod}(k,2)/2} \quad (9)$$

这里 $\text{mod}(k,2)$ 表示 k 对 2 的求模运算。由于 $z_{\text{FMP}}(n)$ 和系数 a_{km} 是线性关系，所以系数可以通过最小二乘的方法求得。定义序列：

$$u_{kq}(n) = \frac{z_{\text{FMP}}(n-q)}{G} \left| \frac{z_{\text{FMP}}(n-q)}{G} \right|^{k-1} \quad (10)$$

当收敛时应该有

$$z_{\text{FMP}} = \mathbf{U} \mathbf{a} \quad (11)$$

这里 $z_{\text{FMP}} = [z_{\text{FMP}}(0), \dots, z_{\text{FMP}}(N-1)]^T$ ， $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_{10}, \dots, \mathbf{u}_{K0}, \dots, \mathbf{u}_{1M}, \dots, \mathbf{u}_{KM}]$ ， $\mathbf{u}_{km} = [u_{km}(0), \dots, u_{km}(N-1)]^T$ ， $\mathbf{a} = [a_{10}, \dots, a_{K0}, \dots, a_{1M}, \dots, a_{KM}]^T$ 。

式(11)的最小二乘解为

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{U}^H \mathbf{U})^{-1} \mathbf{U}^H z_{\text{FMP}} \quad (12)$$

这里 $(\cdot)^H$ 表示矩阵的复共轭转置。

4 仿真及分析

仿真输入是 2048 点 IFFT，1750 个有效子载波数，64QAM 星座调制的 OFDM 信号，无信道编码，8 倍上采样后输入至功放；输入信号峰值平均功率比 PAPR=9.2 dB；用 matlab 对本文第 1 节提出的

功率放大器模型进行验证。

图 3 示出了功率放大器为 Wiener-Hammerstein 模型，不同预失真多项式时功率放大器输出功率谱密度。图中 HPA 指无预失真时功率放大器输出功率谱密度。MP PD 指使用 MP 时功率放大器输出功率谱密度，本文仿真中 $K=[4]$ ， $M=[2]$ 。GMP PD 指使用 GMP 时功率放大器输出功率谱密度，仿真中取 $K=[4]$ ， $M=[4]$ ， $K_b=[3]$ ， $L_b=[0,1]$ ， $M_b=[1,2]$ ， $K_c=[3]$ ， $L_c=[1,2]$ ， $M_c=[1,2]$ 。FMP PD 指使用本文提出多项式时功率放大器输出功率谱密度，仿真中取 $K=[4]$ ， $M=[4]$ 。ORIGINAL 指输入的 OFDM 信号。由图 3 可以看出 GMP 模型增加的交叉性对于记忆多项式模型，取得和 MP 模型相同的预失真效果。相比较该两多项式预失真方法，新提出的预失真多项式在归一化频率 0.4 处取得 10 dB 左右的带外谱抑制增益。

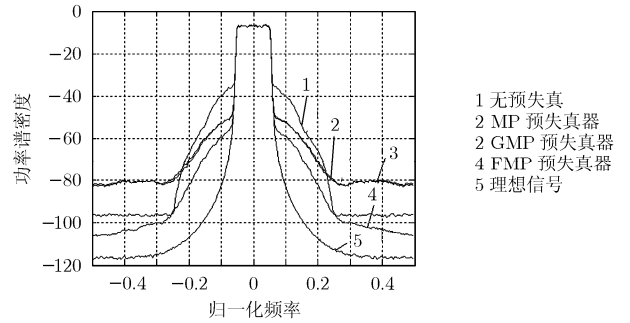


图 3 功率谱密度 (Wiener-Hammerstein 模型)

图 4 示出了功率放大器模型为记忆多项式模型，不同预失真多项式时功率放大器输出功率谱密度。图中 MP 和新提出的预失真多项式预失真时 $K=[4]$ ， $M=[2]$ ，GMP 预失真时取 $K=[4]$ ， $M=[2]$ ， $K_b=[3]$ ， $L_b=[0,1]$ ， $M_b=[1,2]$ ， $K_c=[3]$ ， $L_c=[1,2]$ ， $M_c=[1,2]$ 。由图 4 可以看出 GMP 模型增加的交叉性对于记忆多项式模型，取得和 MP 模型相同的预失真效果。然而新提出的预失真多项式在归一化频率 0.4 处在 MP 和 GMP 预失真的基础上取得 8 dB 左右的带外谱抑制增益。

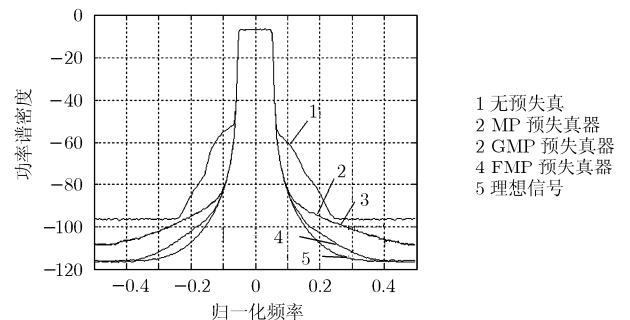


图 4 功率谱密度(记忆多项式模型)

在上述所列模型中,新提出记忆多项式预失真器均能在已有记忆多项式预失真基础上更有效的抑制带外谱辐射。功率放大器线性化的目的包括两个方面:抑制带外谱,降低临近信道干扰和减小带内失真,改善误码率性能。尽管这里只列出了功率谱密度性能,但这并不意味着带内失真并未考虑。当算法收敛时,功率放大器是线性放大的,这已经保证了带内谱和带外谱的性能要求,功率谱密度已满足于验证的要求。

表1列出了3种不同多项式预失真方法实现时所使用硬件资源表。表中多项式预失真器使用ALTERA的EP1S40F780C8实现,对应MP取 $K=4$, $M=2$;GMP取 $K=4$, $M=2$, $K_b=3$, $L_b=[0,1]$, $M_b=[1,2]$, $K_c=3$, $L_c=[1,2]$, $M_c=[1,2]$;新提出记忆多项式取 $K=4$, $M=2$ 。由表1可以看出,新提出多项式的逻辑单元相对MP和GMP分别增加23%和减少了6%,存储资源都增加了13%。可以看出新提出预失真多项式在线性化性能提高的同时硬件资源增加的代价并不高,相对GMP,逻辑单元反倒减少6%。

表1 预失真器硬件资源表

资源	MP	GMP	FMP
逻辑单元	10460	13652	12848
存储器(bits)	1657	1669	1888

5 结论

文中介绍了记忆功率放大器模型,总结和分析了预失真中常用的记忆多项式,并提出了一种新的分数阶记忆多项式预失真器,同时给出了相应的系数估计算法。新提出的预失真多项式是在MP的基础上去掉偶数项,增加分数阶项而得到。仿真分析表明,针对Wiener-Hammerstein和记忆多项式的功率放大器模型,在已有多项式预失真的基础上可以分别得到10 dB和8 dB的带外谱抑制增益。相应FPGA实现表明该预失真多项式总体硬件资源增加的代价并不高,易于在实际系统中应用。

参考文献

[1] Gard K G, Gutierrez H M, and Steer M B. Characterization of spectral regrowth in microwave amplifiers based on the nonlinear transformation of a complex Gaussian process[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory Tech.*, 1999, 47(7): 1059-1069.

[2] Zhou G T and Kenney J S. Predicting spectral regrowth of nonlinear power amplifiers[J]. *IEEE Transactions on Commun.*, 2002, 50(5): 718-722.

[3] Conti A, Dardari D, and Tralli V. An analytical framework for CDMA systems with a nonlinear amplifier and AWGN[J]. *IEEE Transactions on Commun.*, 2002, 50(7): 1110-1120.

[4] Banelli P, Baruffa G, and Cacopardi S. Effects of HPA nonlinearity on frequency multiplexed OFDM signals[J]. *IEEE Transactions on Broadcast.*, 2001, 47(2): 123-136.

[5] Mann S, Beach M, and Warr P, et al. Increasing the talk-time of mobile radios with efficient linear transmitter architectures[J]. *Electronics & Communication Engineering*, 2001, 13(2): 65-76.

[6] Muruganathan S D and Sesay A B. A QRD-RLS-based predistortion scheme for high-power amplifier linearization[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems- II: Express Briefs*, 2006, 53(10): 1108-1112.

[7] 艾渤, 杨知行, 潘长勇等. 高功率放大器线性化技术研究[J]. *微波学报*, 2007, 23(1): 63-70.

Ai B, Yang Z X, and Pan C Y, et al. Research on high power amplifier linearization technique[J]. *Journal of Microwaves*, 2007, 23(1): 63-70.

[8] Ding L, Zhou G T, and Morgan D R, et al. A robust digital baseband predistorter constructed using memory polynomials[J]. *IEEE Transactions on Commun.*, 2004, 52(1): 159-165.

[9] Lee K and Gardner P. Comparison of different adaptation algorithms for adaptive digital predistortion based on EDGE standard[C]. *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 2001, 2: 1353-1356.

[10] He Z Y, Ge J H, and Geng S J, et al. An improved look-up table predistortion technique for HPA with memory effects in OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Broadcast.*, 2006, 52(1): 87-91.

[11] Faulkner M and Mattsson T. Spectral sensitivity of power amplifiers to quadrature modulator misalignment[J]. *IEEE Transactions on Veh. Technol.*, 1992, 41(11): 516-525.

[12] Ding L, Ma Z, and Morgan D R, et al. A least-squares/Newton method for digital predistortion of wideband signals[J]. *IEEE Transactions on Commun.*, 2006, 54(5): 833-840.

[13] Morgan D R, Ma Z, and Kim J, et al. A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(10): 3852-3860.

李波: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为宽带无线通信和功率放大器线性化技术。

葛建华: 男, 1961年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为数字通信、移动通信以及HDTV等。

王勇: 男, 1976年生, 讲师, 博士, 研究方向为宽带无线通信。