

文章编号: 1672—6952(2010)02—0053—05

# 基于模块化模型的自适应预失真技术

沈清波<sup>1</sup>, 无明<sup>2</sup>

(1. 辽宁石油化工大学信息与控制工程学院, 辽宁抚顺 113001;

2. 辽宁省网络通信与信息处理重点实验室, 大连大学信息工程学院, 辽宁大连 116622)

**摘 要:** 系统地比较和分析了 OFDM 传输系统里高功率放大器(HPA)预失真方法的优缺点, 提出一种基于模块化模型的有记忆高功率放大器自适应数字预失真方法, 该方法分别基于 Wiener、Hammerstein 和 Wiener—Hammerstein 模型各自构成一个有记忆 HPA 的自适应预失真器。从而避免了因分别估计 Wiener—Hammerstein 模型各个环节特性参数所带来的复杂性。使得有记忆高功率放大器的预失真设计变得简单了。

**关键词:** 高功率放大器; 自适应预失真; 模块化模型; 系统辨识

**中图分类号:** TN722.75; TG139.6 **文献标识码:** A doi: 10.3696/j.issn.1672-6952.2010.02.015

## Adaptive Predistortion Techniques Based on Block-Oriented Model

SHEN Qing-bo<sup>1</sup>, DING Yuan-ming<sup>2</sup>

(1. School of Information and Control Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun Liaoning 113001, P.R. China;

2. Liaoning Key Lab of Network Communications and Information Processing, Dalian University, Dalian Liaoning 116622, P.R. China)

Received 12 October 2009; revised 9 March 2010; accepted 12 April 2010

**Abstract** The advantages and disadvantages of the previous predistortion methods for high power amplifiers (HPA) in orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) transmitter were compared and summarized systematically. Block-oriented model-based adaptive digital predistortion technique was presented to compensate for the distortions in HPA with memory. The proposed predistortion schemes were explained, where the adaptive predistorters of HPA with memory were constructed based on Wiener model, Hammerstein model and Wiener—Hammerstein model, respectively. Thus, the complexity of the model parameters of all aspects of Wiener—Hammerstein estimated is avoided separately. This makes the predistortion design of a high power amplifier with memory became simple.

**Key words:** High power amplifiers; Adaptive predistortion; Block-oriented model; System identification

Corresponding author. Tel.: +86-413-8828862; fax: +86-413-6860766; e-mail: qingboshen@163.com

正交频分复用(OFDM)调制技术具有着抗多径干扰能力强、频谱利用效率高等优点, 已经被成功地应用于欧洲和日本的数字电视地面传输以及无线 LAN 通信系统<sup>[1-2]</sup>。但是, 在 OFDM 传输系统里, OFDM 信号由于其自身具有高的峰值对平均功率比(PAPR: Peak to Average Power Ratio), 容易受到高功率放大器(HPA)的影响而产生一些失真, 这包括 HPA 所固有的无记忆饱和特性所引起的非线性失真和 HPA 的记忆<sup>[3]</sup>(线性动态特性)所带来的

线性失真。这些失真致使 OFDM 信号的频谱展宽, 成为干扰邻频道的主要原因; 另一方面也恶化了误码率(BER)性能。为了在提高系统能量效率的同时还能确保通信质量, 对这些失真进行补偿已成为 OFDM 应用的一个关键问题。

本文首先对 HPA 预失真法的国内外研究现状进行了分析, 指出了各方法的优缺点, 在此基础上提出基于模块化模型的有记忆高功率放大器预失真技术, 并提出三种自适应预失真设计方法, 这些方法分别是基于 Wiener 模型、Hammerstein 模型和 Wiener—Hammerstein 模型, 从系统辨识、自适应控制和非线性滤波器设计的角度对有记忆 HPA 设计了一个自适应预失真器。

收稿日期: 2009—10—12

作者简介: 沈清波(1958—), 男(满), 辽宁灯塔县, 副教授, 硕士。

## 1 预失真方法

在 OFDM 系统里,减少失真方法主要有两大类:一是,抑制 OFDM 信号的峰值降低 PAPR,使 OFDM 信号受 HPA 影响变小来减小失真,称之为失真抑制法;二是,直接对 HPA 进行线性化设计,使 OFDM 信号能够线性被放大,称之为失真补偿法。失真抑制法主要有峰值限幅法<sup>[4]</sup>、LCP—OFDM (Linearized Constant Peak—power coded OFDM)<sup>[5]</sup>、部分发射序列法(PST: Partial Transmit Sequence 法<sup>[6]</sup>)等。失真补偿法主要有前馈补偿法、负反馈补偿法、预失真法<sup>[7]</sup>。

预失真法作为一种比较有效的补偿技术,被广泛地应用于 HPA 的线性化设计。基于模型的基带数字预失真就是一种通过调整一个具有高功率放大器总体的逆特性的控制器(预失真器)产生控制信号,实现 HPA 线性化的方法。本文所采用的技术属于基带数字预失真补偿法,以下仅对 HPA 的基带数字预失真技术的国内外研究现状进行比较分析。

查表(LUT)法是较具有代表性的方法,这主要是由于其不需要过于复杂的算法就容易用 DSP 来实现。LUT 法是用表里存贮的数据来给出高功率放大器的逆特性,一般来说表格越大对 HPA 的逆特性的近似精度越高、补偿效果越好。但是,研究得出:表格超过一定大小后,并没有明显改善补偿效果<sup>[8]</sup>。由于老化、温度的变化等 HPA 的无记忆非线性特性将发生改变,原来设计的表格数据不在逼近 HPA 的逆特性,补偿性能变坏。为此,将 HPA 的输出信号反馈后与理想线性放大信号(预失真器的输入信号)比较后,更新表格的自适应方式 LUT 法也被提出来<sup>[9]</sup>,并且基于 LUT 方式的自适应预失真装置已经开发成功。

LUT 法具有易于物理实现、算法简单等优点;但是自适应 LUT 法存储容量大、实现 HPA 逆特性的表格数据更新速度慢、在线学习困难。特别是在宽带通信里,仍然应用没有考虑 HPA 的记忆特性(线性动态特性)的 LUT 法时,补偿性能显著变坏。实验研究表明无记忆的 LUT 法不能很好地补偿带内失真<sup>[3]</sup>。对带有记忆 HPA 的预失真补偿, LUT 法存在着需要采样数据多、表格大,为了获得 HPA 逆特性所进行的数据处理变得复杂,HPA 的特性改变时表格数据更新速度慢<sup>[10]</sup>等问题。

多项式法是用一个奇数阶或奇偶数阶的多项式来近似高功率放大器的无记忆非线性实现线性化设计的预失真方法。该方法可以用一个 3 阶至 7 阶复系数的多项式模型 还可以用 2 个实系数多项式各

自补偿 HPA 的振幅特性和相位特性<sup>[11]</sup>。多项式法所采用的模型简单,但不能用来补偿有记忆的高功率放大器。

Volterra 级数模型法较早是基于对 Volterra 级数  $p$  阶逆解析来构成高功率放大器的预失真器<sup>[12]</sup>,向宽带通信应用很难,并且 Volterra 核的增加使  $p$  阶逆解析变得非常复杂。但是基于 Volterra 级数模型的预失真设计法不仅适用于无记忆高功率放大器,也适合于有记忆的高功率放大器。

此外还有基于神经网络和 SVM (Support Vectort Machines)等辨识 HPA、设计 HPA 的预失真器方法<sup>[13-14]</sup>。神经网络法也可以用于有记忆 HPA 的预失真设计,但该方法具有收敛速度慢、局部最优、权重冗余等神经网络凡有的问题。SVM 法用于构成无记忆 HPA 的预失真器时具有较好的补偿效果,但是当 HPA 带有记忆时其预失真补偿性能并不理想。

在国内,对于 HPA 的预失真设计也进行了一些有价值的研究。对于查表法,提出了基于双 LUT 的自适应基带预失真方法,提高了系统的性能<sup>[15]</sup>;对 OFDM 系统里 HPA,提出了基于非线性曲线拟合的数字基带自适应预失真方法,采用双线性有理函数对行波管放大器(TWTA: Traveling Wave Tube Amplifier)Saleh 模型的 AM/AM 和 AM/PM 特性进行分段拟合(辨识),然后求逆变换函数获得了预失真器的非线性特性参数,预失真器具有快速收敛特性<sup>[16]</sup>;还基于 BP 神经网络逼近预失真器 AM/AM 和 AM/PM 特性的预失真方法,并且还提出了一种用模糊神经网络的算法来实现 HPA 的自适应预失真,采用变结构的神经网络大大改善了 NN 法学习时间长点的不足点<sup>[17]</sup>。

目前国内的研究主要针对无记忆 HPA 进行建模和自适应预失真补偿。在国外,对有记忆 HPA 的预失真研究,用 Wiener 模型描述一个带有前置线性滤波器的 HPA 的输入输出关系,模型的结构是一个线性时不变(LTI)系统后跟随一个无记忆非线性单元,这个 LTI 建模一个有限脉冲响应(FIR)成形滤波器被用来研究线性动态特性的影响。用 3 阶的 Volterra 级数模型去辨识这个 HPA 的逆特性。另外,还用了一个 Wiener—Hammerstein 模型去描述了一个卫星通讯信道,这也是通过辨识方法用 Volterra 级数模型建立了 TWTA 模型的预失真器。由于 Volterra 级数模型法要辨识很多的参数(如带有记忆长度为 2 的 3 阶模型的参数是 21 个),随着模型阶数的增加计算更加复杂,VSM 法实时实现是很难的 为了克服上述 Volterra 级数模型法的不

足,文献[19]提出用多项式近似 HPA 的无记忆非线性特性,以减少辨识的参数,并采用了二步辨识方法去辨识 Wiener 模型的参数,然后再用 LMS 法去辨识预失真器参数。其不足之处是为了辨识花费很多的时间,并且算法收敛速度慢。

## 2 自适应预失真设计

为了解决上述预失真设计里所存在的问题,本文分别用具有 Wiener、Hammerstein 和 Wiener—Hammerstein 结构的模块化模型去建模有记忆 HPA,给出了计算量小、算法收敛速度快、失真补偿性能好的自适应预失真设计方法。

### 2.1 模块化模型

图 1 为模块模型的一般结构。Volterra 级数模型对非线性系统的普适性好,用来分析非线性系统是适合的。但从控制的角度来说不希望模型过于复杂,于是图 1 中的模块化模型(Block Oriented Model)往往被用于非线性系统的控制。模块化模型又可按线性模块(L)和非线性模块(N)所处位置的不同分为 Wiener 模型、Hammerstein 模型、Wiener—Hammerstein 模型,其结构可描述如下: Wiener 模型为 L—N、Hammerstein 模型为 N—L、Wiener—Hammerstein 模型为 L—N—L 结构。

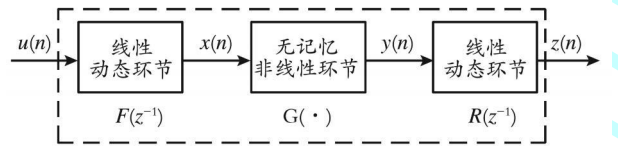


图 1 模块模型的一般结构

对于图 1 所示模块模型,HPA 的无记忆非线性  $G(\cdot)$  可由下式表示:

$$G(\cdot) = A(|x|)e^{jP(|x|)} \quad (1)$$

式中,  $A(|x|)$  和  $P(|x|)$  分别表示无记忆 HPA 的 AM/AM (振幅非线性) 和 AM/PM (相位非线性)。那么 HPA 系统可描述为:

$$\begin{cases} x(n) = F(z^{-1})u(n) \\ y(n) = G(x(n)) = A(|x|)e^{j(\angle x + P(|x|))} \\ z(n) = R(z^{-1})y(n) \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $F(z^{-1})$  和  $R(z^{-1})$  是稳定的最小相位系统,其满足:

$$F(z^{-1}) = f_0 + f_1z^{-1} + \dots + f_{n_f}z^{-n_f} \quad (3)$$

$$\begin{cases} R(z^{-1}) = z^{-d} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \\ B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{n_b}z^{-n_b} \\ A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a} \end{cases} \quad (4)$$

### 2.2 基于 Wiener 模型的预失真设计

对于 Wi 模型描述的有记忆 HPA 进行预

失真设计时,应用基于 Hammerstein 模型的自适应预失真结构(如图 2 所示)。这里,把 HPA 设定为一个最小相位 FIR 滤波器后跟随一个用 Saleh 模型描述的无记忆非线性环节的 Wiener 模型,用 Hammerstein 模型去直接辨识 HPA 总体的逆特性,然后再复制这一逆特性并放置在 HPA 的输入侧就构成了一个预失真器,对 Wiener 模型的 HPA 总体实现了自适应线性化设计,即实现了从预失真器的输入到 HPA 输出间的线性增幅目的( $y(n) = \gamma s(n)$ ,  $s(n)$  是基带 OFDM 信号,  $\gamma$  表示线性增益)。

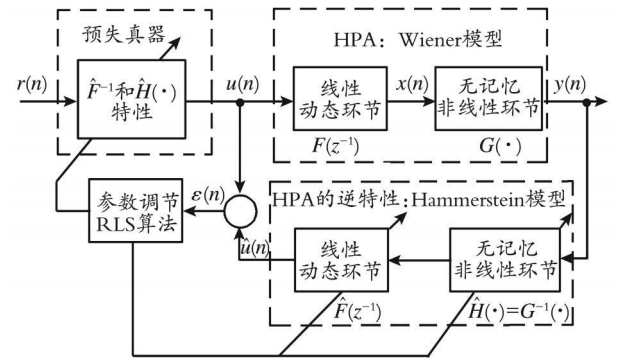


图 2 基于 Wiener 模型的自适应预失真结构

HPA 的 Wiener 模型由(5)式和(6)式描述。

$$F(z^{-1}) = f_0 + f_1z^{-1} + \dots + f_{n_f}z^{-n_f} \quad (5)$$

$$\begin{cases} y(n) = G(x(n)) = A(|x|)e^{j(\angle x + P(|x|))} \\ A(|x|) = \frac{2|x|}{1+|x|^2} \\ P(|x|) = \frac{\pi}{3} \frac{|x|^2}{1+|x|^2} \end{cases} \quad (6)$$

无记忆 HPA 的非线性特性可以用奇数阶的多项式来近似,那么 HPA 总体的逆特性 Hammerstein 模型可以用下式表示:

$$\begin{aligned} \hat{u}(n) = & -\hat{a}_1(n)u(n-1) - \dots - \hat{a}_{n_a}(n)u(n-n_a) + \\ & \hat{b}_1(n)y(n) + \dots + \hat{b}_{2L_h+1}(n)|y(n)|^{2L_h}y(n) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \hat{z}(n) = H(y(n)) = & \sum_{l=0}^{L_h} \hat{h}_{2l+1}(n)|y(n)|^{2l}y(n) \\ = & \hat{h}_1(n)y(n) + \hat{h}_3(n)|y(n)|^2y(n) + \\ & \dots + \hat{h}_{2L_h+1}(n)|y(n)|^{2L_h}y(n) \end{aligned} \quad (8)$$

$$F(z^{-1}) = \frac{b_0(n)}{1 + \hat{a}_1(n)z^{-1} + \dots + \hat{a}_{n_a}(n)z^{-n_a}} \quad (9)$$

$$\hat{b}_i(n) = b_0(n)\hat{h}_i(n), \quad i = 1, 3, \dots, 2L_h + 1 \quad (10)$$

式中,  $H(\cdot)$  表示 HPA 的无记忆非线性  $G(\cdot)$  的逆特性;  $(2L_h+1)$  和  $\hat{h}_{2l+1}(n)$  分别是多项式的阶数和复系数。

### 2.3 基于 Hammerstein 模型的预失真设计

尽管 Wiener 模型可以被用来建模有记忆的 HPA 但是由于 Wi 模型的未知参数是非线性



的, 于是对具有 Hammerstein 结构的 HPA 提出了一种自适应非线性失真补偿算法<sup>[18]</sup>。在这个预失真设计中, 应用图 3 的自适应预失真结构, 用一个奇数阶多项式后跟随一个线性动态特性(线性时不变系统)来近似描述 HPA 总体的输入输出特性, 即用 Hammerstein 模型去建模一个有记忆的 HPA。通过使 Hammerstein 模型的输出  $y(n)$  跟踪期望的线性放大信号  $y_m(n)$  (参考模型的输出), 获得关于控制输入  $u(n)$  的非线性方程, 利用最优化方法(最速下降法)求出方程的数值解, 可实现从预失真器输入  $r(n)$  到 HPA 输出  $y(n)$  之间的线性放大, 即对 Hammerstein 模型 HPA 总体来说实现了一个自适应线性化设计。

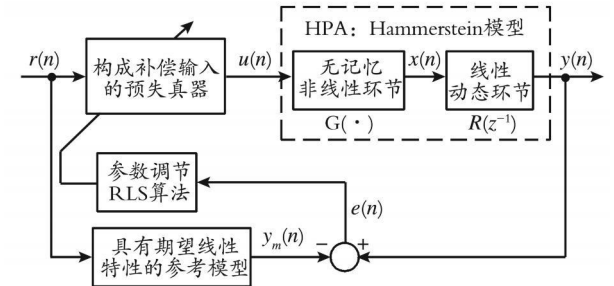


图 3 基于 Hammerstein 模型的自适应预失真结构

这个基于模型匹配 (EMM: Exact Model Matching) 直接设计预失真器的自适应预失真法, 由于不辨识 HPA 的逆系统, 所以不受估计饱和和非特性引起的辨识误差的影响, 可以得到一个较理想的补偿性能。

2.4 基于 Wiener-Hammerstein 模型预失真设计

在模块化模型里, Wiener-Hammerstein 模型是更一般化的模型, 但是对于 Wiener-Hammerstein 模型 HPA 的预失真器设计是比较复杂的。文献 [20] 提出了一个基于频域辨识的预失真设计方法, 通过反复迭代估计获得了 Wiener-Hammerstein 模型的无记忆非线性逆特性和线性动态特性, 再用这些估计特性构成了 HPA 的预失真器, 这是一个非在线辨识、计算量大。

为了解决这一问题, 本文给出了一个在线辨识 HPA 总体的逆特性设计预失真器的方法。在这个设计这里, 应用了图 4 所示的自适应预失真结构, 这个结构与 2.2 节里的预失真结构是一样的。用式 (11) 所示的有记忆幂级数模型 (PSMWM: Power Series Model with Memory) 来近似 HPA 总体特性的逆系统, 构成了一个预失真器。从而避免了因分别估计 Wiener-Hammerstein 模型各个环节特性参数所带来的复杂性。

$$\hat{u}(n) = \hat{\sigma}(z(n))$$

$$= \sum_{m=0}^{L_p} \sum_{l=0}^{L_h} \hat{h}_{2l+1,m}(n) |z(n-m)|^{2l} z(n-m) \tag{11}$$

式中,  $L_p$  表示记忆长度;  $L_h$  是决定模型阶数的参数;  $\hat{h}_{2l+1,m}(n)$  是 PSMWM 的复系数。可以把丢番图 (Diophantine) 方程改写成如下形式:

$$\hat{u}(n) = \varphi_h^H(n) \theta_h(n) \tag{12}$$

式中,  $\theta_h(n)$  和  $\varphi_h^H(n)$  分别定义如下:

$$\theta_h(n) = [\hat{h}_{1,0}(n), \hat{h}_{3,0}(n), \dots, \hat{h}_{2L_h+1,0}(n), \dots, \hat{h}_{2L_h+1,1}(n), \dots, \hat{h}_{2L_h+1,L_p}(n)] \tag{13}$$

$$\varphi_h^H(n) = [z(n), |z(n)|^2 z(n), \dots, |z(n)|^{2L_h} z(n), \dots, |z(n-1)|^{2L_h} z(n-1), \dots, |z(n-L_p)|^{2L_h} z(n-L_p)] \tag{14}$$

这里  $H$  表示向量的共轭转置。PSMWM 的复参数  $\theta_h(n)$  可用如下的递推最小二乘 (RLS) 算法来估计。

$$\theta(n) = \theta(n-1) + \Gamma(n-1) \varphi(n) \varepsilon(n) \tag{15}$$

$$\varepsilon(n) = \frac{z(n) - \varphi^H(n) \theta(n-1)}{1 + \varphi^H(n) \Gamma(n-1) \varphi(n)} \tag{16}$$

$$\Gamma(n) = \frac{1}{\lambda} \left[ \Gamma(n) - \frac{\Gamma(n-1) \varphi(n) \varphi^H(n) \Gamma(n-1)}{\lambda + \varphi^H(n) \Gamma(n-1) \varphi(n)} \right] \tag{17}$$

式中,  $0 < \lambda \leq 1$ ,  $\Gamma(0) = \Gamma^H(0) > 0$ 。

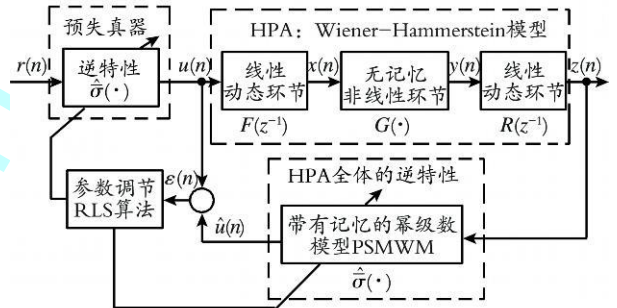


图 4 基于 Wiener-Hammerstein 模型的自适应预失真结构

3 结束语

本文主要讨论了 OFDM 传输系统里有记忆高功率放大器 (HPA) 的基带数字自适应预失真方法。并重点介绍了基于模块化模型的有记忆高功率放大器预失真设计方法, 该模块化模型由无记忆非线性单元和线性动态环节构成, 使有记忆高功率放大器的预失真设计变得不再复杂。

目前, 在 HPA 的基带数字自适应预失真设计里, 对于无记忆高功率放大器 (HPA) 的非线性失真补偿研究主要是用查表 (LUT) 法实现 HPA 的线性化设计; 但在考虑 HPA 的记忆特性时, LUT 法对宽带信号的失真补偿性能低下, 可以建模有记忆非线性系统的 Volterra 级数模型又计算复杂。现有的预失真设计在计算量、补偿性能以及对 HPA 的

记忆失真补偿等方面都存在不足。有记忆 HPA 的预失真研究能够提高对 HPA 的补偿性能, 本文提出的基于模块化模型的自适应预失真技术, 与基于 Volterra 级数模型的预失真技术相比较能够以低计算量、低复杂性, 实时高效地补偿 HPA 的失真。此

外, 通过辨识 HPA 的逆特性构成预失真器的方法又不能获得一个理想的逆特性, 难以获得一个非常高的补偿性能。于是, 对于 Hammerstein 模型 HPA, 本文给出了一种不辨识 HPA 的逆特性就直接生成预失真器的方法。

## 参 考 文 献

- [1] Wu Y, Pliszka E, Caron B. Comparison of terrestrial DTV transmission system; the ATSC 8-VSB, the DVB-T COFDM, and the ISDB-T BST-OFDM[J]. IEEE trans. broadcasting, 2000, 4(2): 101-113.
- [2] Chuang J, Sollenberger N R. Beyond 3G: wideband wireless data access based on OFDM and dynamic packet assignment [J]. IEEE commun. mag., 2000, 38(7): 78-87.
- [3] Muhonen K J, Kavehrad M. Amplifier linearization with memory for broadband wireless applications; proceedings of the 35th IEEE asilomar conference on signals, systems and computers, 2001[C]. [S.l.]: [s.n.], 2000.
- [4] Fujii T, Nakagawa M. Adaptive clipping level control for OFDM peak power reduction using clipping and filtering[J]. IEICE trans. fundamentals, 2002, E85A(7): 1647-1655.
- [5] Uwano S, Matsumoto Y, Mizoguchi M. Linearized constant peak-power coded OFDM transmission for broadband wireless access systems; proceedings of IEEE PIM RC99[C]. [S.l.]: [s.n.], 1999.
- [6] Cimini L J, Sollenberger N R. Peak-to-average power ratio reduction of an OFDM signal using partial transmit sequences[J]. IEEE commun. lett., 2000, 4(3): 86-88.
- [7] 陈贵强, 甘体国, 喻志远. 功率放大器的自适应预失真线性化技术[J]. 电讯技术, 2003, 24(4): 30-33.
- [8] Matsuoka T, Orihashi M, Sagawa M. Compensation of nonlinear distortion during transmission based on the adaptive predistortion method[J]. IEICE trans. electron, 1997, E80-C(6): 782-787.
- [9] Han D S, Hwang T. An adaptive predistorter for the compensation of HPA nonlinearity[J]. IEEE trans. broadcasting, 2000, 46(2): 152-157.
- [10] Aschbacher E, Rupp M. Modelling and identification of a nonlinear power-amplifier with memory for nonlinear digital adaptive pre-distortion; proceedings of the 4th IEEE 2003 workshop on signal processing advances in wireless communications[C]. [S.l.]: [s.n.], 2003.
- [11] Andrea N A D, Lottici V, Regganninir R. RF power amplifier linearization through amplitude and phase predistortion [J]. IEEE trans. Commun., 1996, 44(11): 477-484.
- [12] Lazzarin G, Pupolin S, Sarti A. Nonlinearity compensation in digital radio systems[J]. IEEE trans. Commun., 1994, 42(2): 988-999.
- [13] Abdulkade H, Langlet F, Roviras D. Natural gradient algorithm for neural networks applied to non-linear high power amplifier[J]. Int. j. adapt control signal process, 2002, 16: 557-576.
- [14] Eda T, Ito T, Ohmori H, et al. Adaptive compensation of nonlinearity in high power amplifier by support vector machines; proceedings of IFAC workshop on adaptation and learning in adaptive control and signal processing[C]. [S.l.]: [s.n.], 2001.
- [15] 毛文杰, 冉立新, 陈抗生. 一种基于双查找表自适应预失真结构的射频功率放大器线性化方法[J]. 电路与系统学报, 2003, 8(2): 134-138.
- [16] 杨文考, 周尚波, 朱维乐. 基于大功率放大器估计器的自适应预失真技术[J]. 通信学报, 2002, 23(10): 81-88.
- [17] 邓洪敏, 何松柏, 虞厥邦. 基于模糊神经网络的自适应预失真功放[J]. 信号处理, 2003, 19(4): 334-336.
- [18] 沈清波, 王爱强, 甄明. OFDM 系统功率放大器的自适应预失真线性化[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2006, 26(1): 87-90.
- [19] Kang H W, Cho Y S, Youn D H. On compensating nonlinear distortions of an OFDM system using an efficient adaptive predistorter[J]. IEEE trans. Commun., 1999, 47(4): 522-526.
- [20] Sun L, Ding Y, Sano A. Identification-based predistortion scheme for high power amplifier[J]. IEICE trans. fundamentals, 2003, 86(4): 874-881.