

## 简化的滤波器查找表与神经网络联合预失真方法

刘 月,南敬昌,李诗雨,华一阳

(辽宁工程技术大学电子与信息工程学院,辽宁 葫芦岛 125105)

**摘 要:**针对功率放大器的记忆非线性特性给通信系统带来的失真问题,提出一种改进的滤波器查找表(FLUT)预失真方法。在 FLUT 方法的基础上,改进 FLUT 预失真结构及简化自适应更新部分。采用传输窄带序列训练神经网络模型弥补功率放大器的非线性特性,利用二维滤波器码表补偿功放的记忆效应。通过将功率放大器的非线性特性和记忆效应分开处理,降低神经网络模型的计算复杂度。仿真结果表明,改进方法能有效降低系统误码率,抑制带外频谱扩展,减少带内失真,与原 FLUT 方法相比,对记忆功率放大器有更好的线性化效果。

**关键词:**预失真;滤波器查找表法;神经网络;滤波器矩阵;非线性特性;记忆效应

**中文引用格式:**刘 月,南敬昌,李诗雨,等. 简化的滤波器查找表与神经网络联合预失真方法[J]. 计算机工程, 2015, 41(1):169-173.

**英文引用格式:**Liu Yue, Nan Jingchang, Li Shiyu, et al. Joint Predistortion Method of Simplified Filter Look-up Table and Neural Network[J]. Computer Engineering, 2015, 41(1):169-173.

## Joint Predistortion Method of Simplified Filter Look-up Table and Neural Network

LIU Yue, NAN Jingchang, LI Shiyu, HUA Yiyang

(School of Electronics and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**【Abstract】**To solve the problem of distortion caused by the memory and nonlinearity of power amplifier in communication system, an improved Filter Look-up Table (FLUT) predistortion method is proposed. The new method improves the FLUT predistortion structure, and simplifies the adaptive update part. It transmits the narrowband sequence to train the neural network to compensate the nonlinear characteristics of Power Amplifier (PA), and uses 2D filter table to compensate the memory effect. It deals with the nonlinearity and memory effects of power amplifier separately, and reduces the complexity of model coefficient identification. Simulation results show that the improved method can restrain the expansion of spectrum effectively, reduce the bit error rate and inner distortion, thus achieve a better linearization for the PA with effects than FLUT method.

**【Key words】**predistortion; Filter Look-up Table (FLUT) method; neural network; filter matrix; nonlinear characteristic; memory effect

**DOI:**10.3969/j.issn.1000-3428.2015.01.031

### 1 概述

在频谱资源日益紧张的今天,为提高通信效率与频谱利用率,现代无线通信系统中广泛采用线性调制方式及多载波调制等技术,但这些技术对信道的非线性非常敏感。非线性一般由高功率放大器(High Power Amplifier, HPA)的传输特性不理想引起,导致有效频带内的信号失真和带外频谱扩

展<sup>[1-2]</sup>,降低通信系统性能。基带预失真技术是补偿 HPA 的非线性失真的一种有效的方法。早期的研究工作主要集中在无记忆预失真方面,如卫星通信中,这是因为大多数系统或信号的工作带宽要比功放的带宽小,此时就可以忽略功放的记忆效应。但随着移动通信的发展,其数据传输速率越来越高,所需的带宽也越来越宽,因此在宽带通信系统中设计预失真器必须考虑记忆效应<sup>[3]</sup>。

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(61372058);辽宁省高等学校优秀人才支持计划基金资助项目(LR2013012)。

**作者简介:**刘 月(1990-),女,硕士研究生,主研方向:多媒体信息编码,功率放大器线性化技术;南敬昌,教授、博士;李诗雨,硕士;华一阳,本科生。

**收稿日期:**2014-03-12 **修回日期:**2014-05-08 **E-mail:**lyuelove@126.com

目前,比较流行的预失真模型主要有基于多项式、基于神经网络和基于查找表(Look-up Table, LUT)三大类。基于多项式的预失真模型有 Wiener-Hammerstein 模型、Volterra 级数及简化记忆多项式模型等<sup>[4]</sup>。基于神经网络的预失真模型有 MLP 神经网络、RBF 神经网络、正交基神经网络、小波神经网络模型<sup>[5-6]</sup>等。神经网络能够近似任意的非线性函数,与基于多项式的预失真模型相比能更好地拟合预失真器的特性曲线。基于查找表的预失真模型有二维查找表模型、多维查找表模型、滤波器查找表模型等。与多项式的预失真相比,LUT 法计算复杂度低、模型精度高,而且随着 DSP 和 FPGA 技术的快速发展,受到广泛关注。文献[7]提出了记忆查找表预失真的二维索引方法,引入第二维索引 Y 来区分输入信号不同时的记忆性,能够减轻由记忆效应引起的信号失真,改善信号的相位失真、抑制带外频谱扩展,量化噪声和存储容量限制了这种技术的发展。文献[8]提出了使用多个查找表来补偿 HPA 的记忆性,用指数衰退加权平均功率来表征 HPA 的记忆性,查找表修改和使用比较灵活,但需要更大的存储空间和更长的自适应收敛时间。文献[9]提出了滤波器查找表技术,采用一个无记忆预失真器串联一个滤波器的结构来模拟功放记忆非线性特性的逆特性。滤波器查找表(Filter Look-up Table, FLUT)法补偿性能好且容易实现,在自适应滤波器发展成熟的今天,是一个较好的优化方法。

FLUT 方法不仅结构复杂,而且收敛精度较低。本文在 FLUT 方法的基础上,改进了 FLUT 预失真自适应更新结构和预失真器模型。采用由滤波器矩阵和神经网络级联而成的改进 FLUT 预失真器模型,有效弥补采用 FLUT 带来的功率放大器逆记忆效应描述不充分和非线性引起的失真问题,同时利用简化的自适应更新结构解决原 FLUT 反馈支路结构复杂的问题。

## 2 滤波器查找表预失真

FLUT 采用查找表和滤波器同时进行预失真,该方法兼顾了冷 PA 的非线性和记忆效应。如图 1 所示,由一个查找表和一个滤波器组成,共同对输入信号进行预失真<sup>[10-11]</sup>。

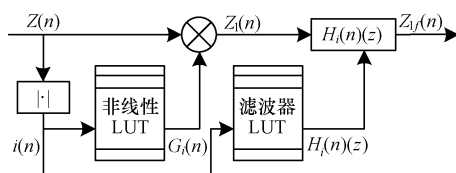


图 1 滤波器查找表的内部结构框图

查找表的输入和输出信号分别为  $z(n)$  和  $z_l(n)$ , 关系为:

$$z_l(n) = G_i(n)z(n) \quad (1)$$

在图 1 中,  $i(n)$  决定在滤波器中将哪个表项用作 LUT 的预失真信号  $z_l(n)$ 。在滤波器中,对于第  $j$  个表项,其传输函数为:

$$H_j(z) = \sum_{k=0}^{L-1} h_j(k)z^{-k} \quad (2)$$

由此整个系统的预失真信号  $z_{lf}(n)$  可以表示为:

$$z_{lf}(n) = \sum_{k=0}^{L-1} h_{i(n)}(k)z_l(n-k) = \sum_{k=0}^{L-1} h_{i(n)}(k)G_{i(n-k)}z(n-k) \quad (3)$$

其中,  $G_{i(n-k)}$  是对应于幅度  $|z(n-k)|$  量化值索引在 LUT 中的增益值。

文献[9]提出了 FLUT 预失真的基本结构,如图 2 所示。在反馈支路,FLUT 预失真采用间接学习结构,将放大器的输出信号经过相同参数的非线性 LUT 和滤波器 LUT。用直接学习结构更新非线性 LUT,用间接学习结构更新滤波器的抽头系数。FLUT 预失真的反馈支路结构复杂,其中,滤波器 LUT 的索引仅为当前输入信号的幅值,不能考虑历史输入信号的影响。

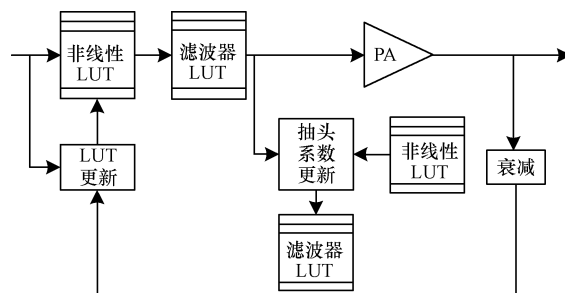


图 2 FLUT 预失真的基本结构框图

## 3 简化的 FLUT 与神经网络联合预失真

本文在 FLUT 结构的基础上对其进行改进:将有记忆放大器的预失真器模型分解为滤波器 LUT 子系统与神经网络子系统的串联,这 2 个子系统分别补偿放大器线性子系统和无记忆非线性子系统;同时,均采用直接学习方法更新神经网络和自适应滤波器 LUT,改进 FLUT 预失真的结构框图如图 3 所示。

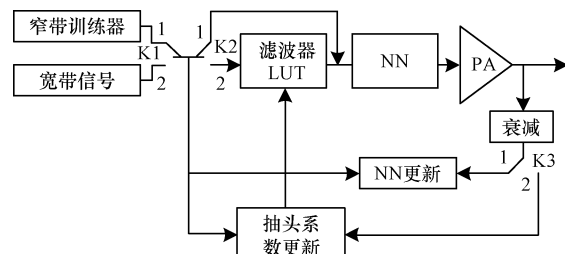


图 3 改进的 FLUT 预失真的结构框图

改进的 FLUT 预失真调换了非线性 LUT 与滤波器 LUT 的位置,并用神经网络替换了非线性 LUT,但仍满足式(3),能够弥补功放的记忆非线性特性。首先将开关 K1、K2 和 K3 导向与之相应的管脚 1、管脚 2、管脚 3,训练序列产生单元输出一个带宽远小于功放带宽的窄带阶梯形训练序列<sup>[12-13]</sup>,由神经网络补偿功放的非线性特性,采用直接结构更新神经网络的权值。自适应算法中误差函数逐渐收敛,当误差函数收敛到门限值时,神经网络的权值更新完成,功放的非线性失真被补偿。此时,开关 K1、K2 和 K3 导向管脚 2,启动滤波器 LUT 消除功放的记忆效应,采用直接学习结构更新滤波器 LUT,补偿记忆效应引起的功放失真。

文献[9]认为自适应滤波器系数更新的准确性会受放大器的非线性失真影响,建议采用间接学习结构更新滤波器 LUT<sup>[10]</sup>。本文提出结构首先补偿了功放的非线性,避免了非线性失真对滤波器系数更新的影响,采用直接结构更加精简。对比图 2,改进 FLUT 预失真结构在反馈支路少使用了一个非线性 LUT 与一个滤波器 LUT,因此其系统复杂度相比 FLUT 预失真大大简化。

### 3.1 神经网络预失真子系统

神经网络预失真子系统采用直接学习结构自适应更新神经网络权值与阈值,如图 4 所示。随着预失真系统的不断运行,自适应算法误差逐渐减小,神经网络趋向于收敛,当神经网络最终收敛时,功放的非线性特性被补偿。因为神经网络系统只拟合了功放的无记忆非线性子系统的逆特性,所以该系统可以看作一个无记忆效应功放的自适应预失真系统。神经网络模型采用结构简单的单入单出三层前向神经网络,如图 5 所示。

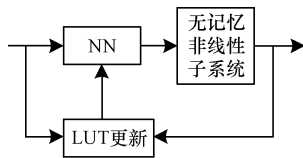


图 4 神经网络预失真子系统结构

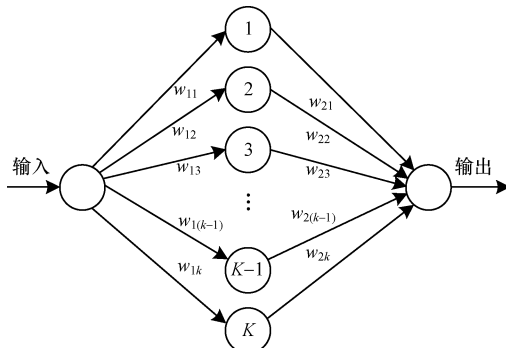


图 5 单入单出三层前向神经网络

无记忆效应功放的预失真有多种自适应更新算法,本文神经网络预失真子系统采用带有动量因子的梯度下降训练算法更新权值<sup>[14]</sup>,该算法由加入动量因子的训练算法和 LM(Levenberg Marquardt)学习算法相结合,加快网络训练速度,并且避免了网络陷入局部最小值,计算公式如下:

$$e(t) = \frac{1}{2}(y(t) - d(t))^2 \quad (4)$$

$$\Delta\omega(t) = -\eta \frac{\partial e(t)}{\partial \omega(t)} + \alpha \Delta\omega(t-1) \quad (5)$$

其中,  $y$  表示网络实际输出;  $d$  表示网络期望输出;  $e$  为网络输出误差;  $\eta$  为网络学习速率;  $\alpha$  是动量因子;  $\eta, \alpha \in [0, 1)$ 。

### 3.2 FLUT 预失真子系统

基于对 FLUT 的研究,滤波器系数向量的选择仅由当前输入信号的幅值决定,对记忆效应的描述不够充分。为更精确地描述功放的逆记忆效应,滤波器系数向量的选择应能够考虑更多的输入信号的影响。若预失真器的记忆深度为  $L$ ,则要考虑  $L$  个输入信号的影响,这使得滤波器系数向量的索引变得十分复杂,同时还会引入较多的量化误差。因此,本文提出用一个  $N \times N_{\text{FIR}}$  的滤波器矩阵来实现滤波器 LUT 预失真子系统,解决记忆效应精确描述和索引过程复杂的矛盾。滤波器矩阵的每一项是一组滤波器系数向量  $\mathbf{h}_{i,j}$ 。该矩阵采用二维索引技术,滤波器系数向量的选择由 2 个与输入序列有关的参量决定:第 1 个索引参量为当前输入信号的幅值;第 2 个索引参量应与历史输入有关。文献[7]记忆查找表中第 2 维索引为历史输入信号幅值的总和。虽然这种方法可行,但其不能反映历史输入对当前输入的影响。因此,第 2 个索引参量需要用能反映历史输入对当前输入影响的变量来表示。本文定义该变量为  $\gamma_n$ ,将  $\gamma_n$  量化即可作为滤波器查找表的第 2 个索引参量,表示如下:

$$\gamma_n = \frac{\left| x(n) - \frac{[x(n-1) + x(n-2) + \cdots + x(n-L)]}{L} \right|}{x(n)} \quad (6)$$

FLUT 预失真子系统采用直接学习结构,其结构框图如图 6 所示。

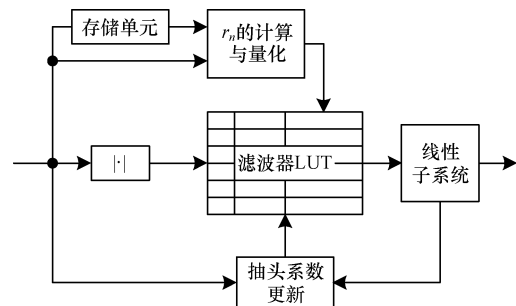


图 6 FLUT 预失真子系统的结构框图



采用 LMS 算法自适应更新滤波器的系数  $h_{i,j}$ , 使得滤波器 LUT 预失真子系统的输出信号趋近于输入信号。当最终输出等于输入时, 滤波器 LUT 即可消除记忆效应引起的失真。

LMS 算法的自适应更新公式为:

$$h_{i,j}(n+1) = h_{i,j}(n) + \lambda x(n) e^*(n) \quad (7)$$

其中,  $h_{i,j} = (h_{i,j}(0), h_{i,j}(1), \dots, h_{i,j}(L-1))$ ;  $x(n)$  为滤波器 LUT 子系统的输入信号;  $y(n)$  为反馈信号;  $e(n) = x(n) - y(n)$ ; “\*” 表示共轭;  $\lambda$  为步长因子。

#### 4 仿真结果与分析

在仿真系统中, 输入信号经 64QAM 调制后通过升余弦滚降滤波器<sup>[3]</sup>, 滤波器的滚降系数为 0.5, 升采样率为 8。为便于仿真, 需对滤波后的信号进行归一化, 并进行 4 dB 的功率回退。设神经网络隐含层有 5 个神经元, 初始权值设为 1; 对于滤波器矩阵, 其行数  $N$  设为 16, 列数  $N_{FIR}$  设为 4, 滤波器的冲激响应初始化为单位脉冲。

本文用有记忆的 Saleh 模型作为功放模型<sup>[15]</sup>, 其中, 无记忆 Saleh 模型作为功放的无记忆非线性子系统, 其参数如式(8)所示:

$$\begin{cases} f(A) = \frac{2A}{1+A^2} \\ g(A) = \frac{\pi A^2}{3(1+A^2)} \end{cases} \quad (8)$$

功放的线性子系统用一个 3 阶的 FIR 滤波器模拟<sup>[16]</sup>, 其系数为  $[0.793\ 2, 0.182\ 4, 0.079\ 3]$ 。

图 7 为 FLUT 方法和本文方法信号的频谱比较。2 种方法都有效抑制了带外频谱扩展, 但是本文方法较 FLUT 方法更好地压低了频谱的旁瓣, 相比 FLUT 方法能多压低 10 dB 左右, 可以更有效地抑制临信道干扰。

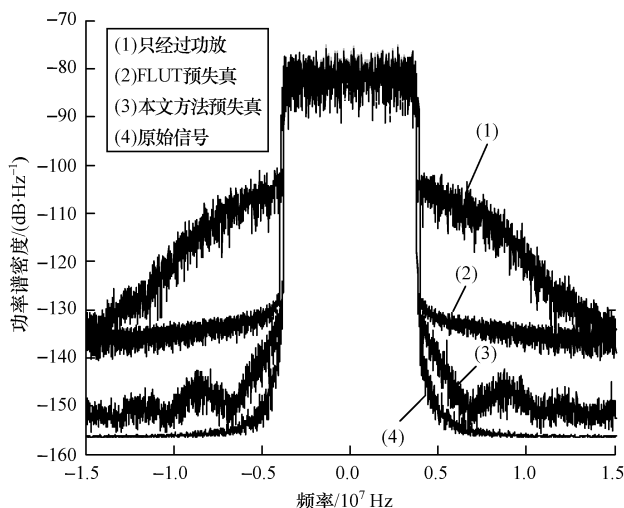


图 7 信号频谱比较

星座图是用横纵坐标分别为信号同向分量与正交分量的矢量图来表示信号特性的, 图 8 给出了原始信号、直接经过功放、使用 FLUT 方法和本文方法的输出信号星座图。由此可见 2 种方法都有效地改善功放非线性失真带来的旋转和扩散问题。对比 FLUT 和本文方法可以看出, 本文方法的星座点的收敛情况更好, 星座图基本接近原始信号星座图。

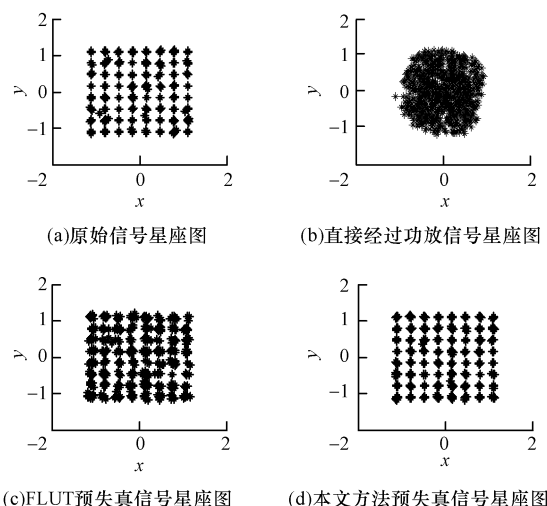


图 8 输入输出信号星座图比较

图 9 为误码率性能比较情况。对比 3 条曲线可以发现, 经 FLUT 方法和本文方法预失真后, 误码率曲线均趋近于理想情况, 但是本文方法误码率性能仍优于 FLUT 方法。当误码率为  $10^{-3}$  时, 本文方法相对于 FLUT 大约有 1 dB 的增益。

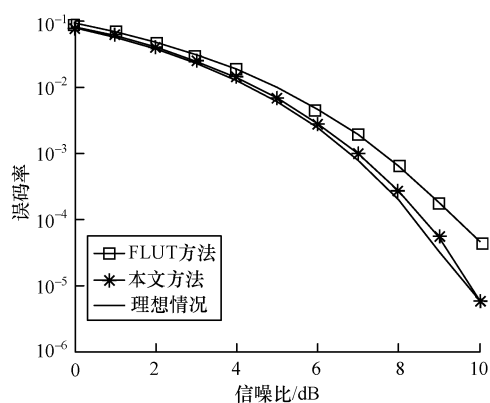


图 9 误码率比较

图 10(a)、图 10(b) 分别给出了无预失真、FLUT 方法预失真与本文方法预失真的功放幅度特性曲线。可以发现, 经过预失真后功放非线性特性的改善较为明显, 由原来的发散变成现在的较为收敛状态, 并且本文方法的输出信号幅度特性曲线更趋近于一条直线, 优于 FLUT 方法。

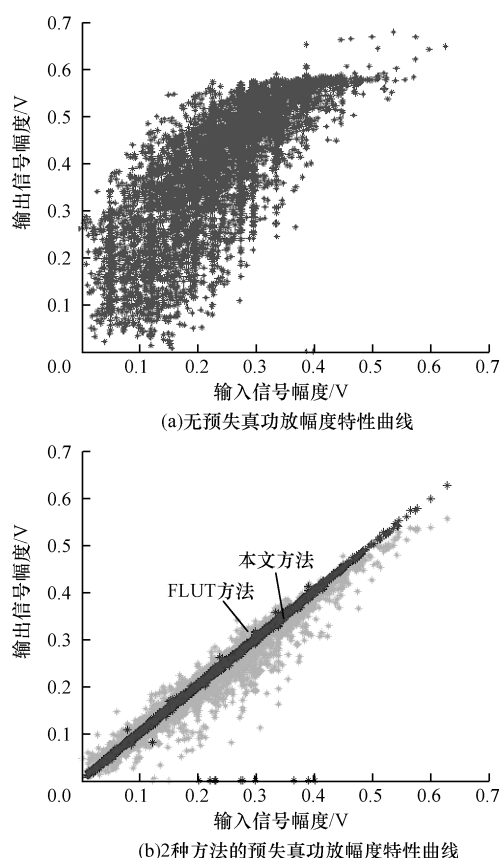


图10 预失真前后功放幅度特性曲线比较

## 5 结束语

针对记忆放大器失真问题,滤波查找表(FLUT)法是近年来提出的能够消除失真的较好方法,但存在系统结构复杂、对功放记忆效应补偿不充分的缺点。本文在FLUT方法的基础上,改进了FLUT预失真结构,简化了自适应更新部分。首先用窄带训练序列通过神经网络子系统补偿功放非线性;再利用二维FLUT体现历史输入对当前输入的影响,精确补偿功放的记忆效应。与原滤波查表法相比,该方法有效降低了反馈支路的复杂度,更精确地描述了带记忆效应功放非线性的逆特性,同时能提升系统整体性能,有效解决宽带系统中存在的记忆放大器失真问题。

## 参考文献

- [1] Helaly T K, Dansereau R M, El-Tanany M. Analysis of BER Performance in Presence of Nonlinear Distortion Due to PD-HPA Indownlink DS-CDMA Signals [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(4): 273-275.
- [2] 杨友福, 张其善, 刘建伟. 基于查表的开环MPM预失真器[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(3): 400-404.
- [3] 侣秀杰. 记忆功率放大器数字预失真技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [4] Lei Ding, Zhou G T, Morgan D R, et al. A Robust Digital Baseband Pre-distorter Constructed Using Memory Polynomials [J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(1): 159-165.
- [5] 唐成凯, 廉保旺, 张玲玲. 卫星通信中动态神经网络预失真算法研究[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(1): 34-39.
- [6] 任建伟, 南敬昌, 丛密芳. 基于神经网络的射频功放行为模型研究[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(3): 845-847.
- [7] Ai B, Yang Z Y, Pan C Y. Improved LUT Technique for HPA Nonlinear Pre-distortion in OFDM Systems [J]. Wireless Personal Communications, 2006, 38(4): 495-507.
- [8] Chen H H, Lin C H, Chen J T, et al. Joint Polynomial and Look-up Table Power Amplifier Linearization Scheme [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2006, 53(8): 612-616.
- [9] Jardin P, Baudoin G. Filter Look-up Table Method for Power Amplifier Linearization [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(3): 1076-1087.
- [10] 任智源, 张海林. 一种宽带OFDM系统放大器的失真消除方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(6): 726-738.
- [11] 胡莉, 艾渤. 功率放大器记忆效应分析及有记忆预失真技术[J]. 软件, 2011, 32(5): 45-49.
- [12] 王勇, 向新, 易克初. 基于多项式的记忆型数字基带预失真[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2006, 33(2): 223-226.
- [13] 王勇, 向新, 易克初. 宽带正交频分复用系统的记忆型预失真器[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(9): 1456-1459.
- [14] 陈庆霆, 王成华, 朱德伟, 等. 改进BP神经网络的功放有记忆行为模型[J]. 微波学报, 2012, 28(2): 90-93.
- [15] 张玉梅, 南敬昌. 基于Saleh函数的功放行为模型研究[J]. 微电子学与计算机, 2010, 49(12): 35-39.
- [16] 任智源, 韩燕, 张海林. 宽带OFDM系统中的简化滤波查表预失真算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(7): 1369-1372.

编辑 陆燕菲