

一种基于滤波器矩阵的 Hammerstein 预失真器

侣秀杰*, 金明录, 刘文龙

(大连理工大学 电子信息与电气工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 预失真器建模的准确性是保证有效补偿带记忆功率放大器非线性失真的重要因素之一,尤其是模型对功率放大器逆记忆特性的描述能力.针对目前预失真器模型对功率放大器逆记忆效应描述不充分的问题,提出一种改进的 Hammerstein 预失真器,该预失真器以查找表级联滤波器矩阵作为其实现形式,较好地描述了功率放大器的逆记忆特性.仿真实验表明,提出的 Hammerstein 预失真器能有效地降低系统的均方误差,抑制频谱扩展,达到了对带记忆效应功率放大器良好的线性化目的.

关键词: 记忆效应;预失真模型;Hammerstein 预失真器;滤波器矩阵

中图分类号: TN919 **文献标志码:** A

0 引言

现代无线通信为多用户在同一射频信道提供高速率的多媒体服务,而这些高质量的服务是以增加信号带宽为代价的.宽带信号具有非恒包络、高峰均比的特性,这些特性不仅增加了功率放大器(power amplifier, PA)的非线性失真而且使得 PA 的记忆效应不能再被忽视. PA 的记忆效应给系统引入了更严重的带内和带外的失真(频谱间干扰),增加了系统误码率和相邻信道间干扰^[1,2].传统的无记忆预失真器(predistorter, PD)不能很好地补偿带记忆效应 PA 的非线性,因此对记忆预失真器的研究成为这一领域的研究热点.

预失真技术是通过在 PA 前级联一个与 PA 特性(非线性及记忆效应)相反的 PD 来达到线性化目的的,其线性化性能取决于对预失真器建模的准确性^[3](即对 PA 逆特性描述的精确程度),以及系统辨识算法的性能.然而,建模的准确性与系统辨识算法的性能之间存在着制约关系:如果一味追求对系统行为描述的准确性就会使模型辨识算法的复杂度很高;反之,只顾及降低算法的复杂度则会导致模型对系统行为描述性能的降低.因此,在对 PD 进行系统建模时需要权衡两方面的关系.需要指出的是,预失真器建模的一个关键

问题是该模型对 PA 逆记忆特性的描述能力^[4,5].

目前,为了补偿带记忆效应 PA 的非线性失真,PD 多采用记忆多项式模型^[6,7](MPM)和 Hammerstein 模型^[8~10].MPM 是由 Volterra 级数模型简化而来,它只保留 Volterra 级数核函数对角线部分.该模型的主要缺点在于对 PD 记忆效应的描述不充分,且保留了 Volterra 级数模型只在有限系统输入幅度范围内收敛的问题.基于 Hammerstein 模型的 PD 是由非线性系统级联线性系统而成,能够较准确地描述 PA 的逆特性,即能够较好地补偿带记忆效应功率放大器的非线性失真.但是,精确地描述 PA 逆记忆效应和高效的辨识算法是 Hammerstein 预失真研究的难点.

针对常用的 Hammerstein 预失真器对 PA 逆特性描述不够充分且系统辨识困难的问题, Jarden 提出用一种滤波器查找表的方法来实现 Hammerstein 模型中的线性子系统,并得到了对带记忆效应 PA 非线性失真较好的补偿性能.在该 PD 研究基础上,本文提出改进的 Hammerstein 预失真器,重点在于提高对 PA 记忆效应的补偿能力,采用复增益查找表(LUT)级联滤波器矩阵作为其实现形式,以有效地补偿带记忆效应 PA 的非线性失真.

1 基于滤波器查找表的预失真器

Hammerstein 模型属于两箱结构,由一个静态非线性子系统级联一个线性动态子系统组成.当用 Hammerstein 模型作为 PD 的模型时,两个子系统分别用于补偿 PA 非线性和记忆效应引起的失真,即 PD 应具有与 PA 的非线性和记忆效应完全相反的特性.

文献[8]提出的 PD (记为 FLUT)由一个复增益查找表和一个滤波器查找表组成,分别用于实现 Hammerstein 模型的静态非线性子系统和线性动态子系统. FLUT 的结构和信号流程如图 1 所示,其中 $z(n)$ 是 PD 的输入数据, $z_1(n)$ 是 LUT 模块的输出, $z_{lf}(n)$ 是 PD 的输出, $|\cdot|_Q$ 表示对数据取模并进行量化. FLUT 的算法复杂度低,且能够较有效地补偿带记忆效应功率放大器的非线性失真.

FLUT 与一般 Hammerstein 预失真器(LUT 级联一个滤波器)相比,对带记忆效应 PA 非线性失真补偿效果较好的原因在于: Hammerstein 模型中线性子系统由一个滤波器查找表来完成,滤波器的选择与当前输入信号有关,即当前输入信号决定系统采用哪一组滤波器系数向量,用公式表示为 $\mathbf{h}|_{x_n}$, 其中 $\mathbf{h}$ 是有限冲激响应(FIR)滤波器的系数向量, x_n 是当前输入信号.

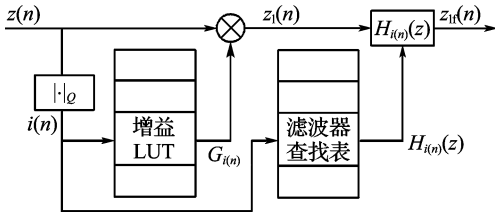


图 1 FLUT PD 结构

Fig. 1 The structure of FLUT PD

2 改进的 Hammerstein 预失真器

为更有效地补偿 PA 记忆效应引起的失真,本文提出一种基于 FLUT 改进的 Hammerstein 预失真器.该预失真器中非线性子系统仍采用查找表来描述.查找表中存放的是一组复增益值 $\mathbf{G}$,其寻址是通过输入信号幅值进行均匀量化的方法得到.当前输入记作 $z(n)$,其信号最大幅值为 $z_{\max}$,如果查找表大小为 N ,有量化步长 $q = z_{\max}/(N-1)$,则 LUT 索引指针 $i(n)$ 的值为

$$i(n) = \left\lfloor \frac{|z(n)|}{q} + \frac{1}{2} \right\rfloor \quad (1)$$

其中 $\lfloor x \rfloor$ 表示对 x 向下取整运算.

根据得到的索引指针针对 LUT 寻址输出对应当前输入的复增益值 $G_{i(n)}$,则非线性子系统的输出

$$z_1(n) = G_{i(n)} z(n) \quad (2)$$

基于对 FLUT 的研究,滤波器的参数如果能够考虑尽可能多的输入信号,Hammerstein 预失真器对 PA 的逆记忆效应的描述应会更精确,即滤波器向量的选择由输入序列决定,即 $\mathbf{h}|_{x_n}$ (设 L 为预失真器的记忆长度,那么 $\mathbf{x}_n = (x_n \ x_{n-1} \ \cdots \ x_{n-L+1})$).因为要考虑 L 个输入信号的影响,这使得对滤波器系数向量的索引过于复杂,同时会引入较多的量化误差.为了解决上述问题,本文提出用一个 $N \times N_{\text{FIR}}$ 的滤波器矩阵来实现 Hammerstein 预失真器的线性子系统.该矩阵的每一项是一组滤波器系数向量 $\mathbf{h}_{i,j}$,即滤波器系数向量的选择仅由两个与输入序列有关的参量决定.因为当前输入信号是最主要且不容忽略的一个影响因子,因此决定滤波器系数向量选择的一个参量应与当前输入有关.另外,决定滤波器系数向量选择的第 2 个参量应与历史输入有关,虽然可考虑历史输入的总和,但是其不能反映对当前输入的影响,因为系统所要求解的毕竟是对应当前输入的有效输出.因此,历史输入需要用一个综合且合理的变量来表示,本文定义该变量为 r_n ,其表示如下所示:

$$r_n = \sum_{i=1}^{L-1} \frac{|z(n) - z(n-i)|}{|z(n)|} \quad (3)$$

变量 r_n 能定量地表征历史输入数据对当前输入数据的影响.因此, $\mathbf{h}|_{x_n}$ 被简化为 $\mathbf{h}|_{x_n, r_n}$.

滤波器矩阵的索引根据表项内容的影响因子 x_n 和 r_n 进行设计:第一维索引采用对当前输入信号 x_n 进行均匀量化得到,即采用与非线性部分 LUT 相同的索引 $i(n)$;第二维索引 $j(n)$ 通过对参数 r_n 进行均匀量化得到.如果 r_n 的取值范围是 0 到最大值 $r_{\max}$,量化步长记为 $p = r_{\max}/(N_{\text{FIR}} - 1)$,则第二维索引 $j(n)$ 可以表示为

$$j(n) = \left\lfloor \frac{r_n}{p} + \frac{1}{2} \right\rfloor \quad (4)$$

根据第二维索引确定对应于线性系统输入 $\mathbf{z}_1(n) = (z_1(n) \ z_1(n-1) \ \cdots \ z_1(n-L+1))^T$ 的 FIR 滤波器系数向量 $\mathbf{h}_{i,j} = (h_{i,j}(0) \ h_{i,j}(1) \ \cdots \ h_{i,j}(L-1))$,则 FIR 滤波器的输出 z_{lf} 表示如下:

$$z_{lf}(n) = \sum_{k=0}^{L-1} h_{i,j}(k) z_1(n-k) \quad (5)$$

因此,提出的改进 Hammerstein 预失真器如图 2 所示. 图中, $\mathbf{z}_{n-1}$ 表示向量 $(z(n-1) \ z(n-2) \ \cdots \ z(n-L+1))$.

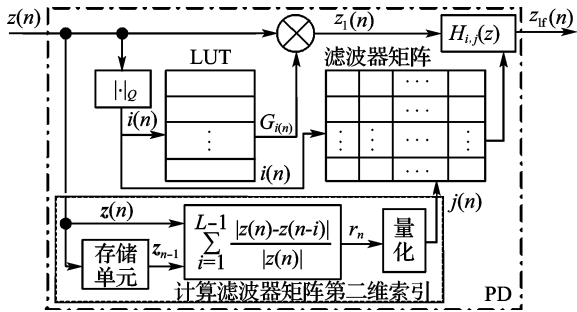


图 2 提出的 Hammerstein PD 结构
Fig. 2 The structure of proposed Hammerstein PD

对于本文提出的 Hammerstein 预失真器,两个子系统分别采用直接学习结构和非直接学习结构^[8]对其参数进行更新. 因此,两个子系统的更新公式分别如式(6)和式(7)所示.

$$G_i^{(k+1)} = G_i^{(k)} \left(1 - \delta \frac{z_{\text{lf}a}(n) - z(n)}{z_{\text{lf}a}(n)} \right) \tag{6}$$

其中 $z_{\text{lf}a}(n)$ 为带 PD 的 PA(记为 PD+PA) 的输出, δ 是自适应步长.

$$\mathbf{h}_{i,j}^{(k+1)} = \mathbf{h}_{i,j}^{(k)} + \mu \mathbf{z}_{\text{lf}a}^*(n) (z_{\text{lf}}(n) - z_{\text{lf}a}(n)) \tag{7}$$

其中 $\mathbf{h}_{i,j} = (h_{i,j}(0) \ h_{i,j}(1) \ \cdots \ h_{i,j}(L-1))$, $\mathbf{z}_{\text{lf}a}(n) = (z_{\text{lf}a}(n) \ z_{\text{lf}a}(n-1) \ \cdots \ z_{\text{lf}a}(n-L+1))^T$ 是非直接学习结构中后失真器 LUT 部分的输出向量, $z_{\text{lf}a}(n)$ 是非直接学习结构中后失真器当前时刻的输出, μ 是自适应步长.

3 仿真实验及分析

为验证所提出的 Hammerstein 预失真器的有效性,对该 PD 进行仿真. PA 模型采用只有奇数阶的记忆多项式模型,其记忆长度为 M ,阶为 P . 在时刻 n ,PA 的输出可以表示为

$$y(n) = \sum_{m=0}^M \sum_{p=1, p \text{ 为奇数}}^P \alpha_{m,p} |x(n-m)|^{p-1} x(n-m) \tag{8}$$

其中 $M = 2, P = 5$,系数 $\alpha_{m,p}$ 如下所示^[11]:

$$\begin{aligned} \alpha_{0,1} &= 1.051\ 3 + 0.090\ 4i; \\ \alpha_{1,1} &= -0.068\ 0 - 0.002\ 3i; \\ \alpha_{2,1} &= 0.028\ 9 - 0.005\ 4i; \\ \alpha_{0,3} &= -0.054\ 2 - 0.290\ 0i; \\ \alpha_{1,3} &= 0.223\ 4 + 0.231\ 7i; \\ \alpha_{2,3} &= -0.062\ 1 - 0.093\ 2i; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{0,5} &= -0.965\ 7 - 0.702\ 8i; \\ \alpha_{1,5} &= -0.245\ 1 - 0.373\ 5i; \\ \alpha_{2,5} &= 0.122\ 9 + 0.150\ 8i \end{aligned}$$

系统输入采用 16QAM 调制信号,并通过升余弦滚降滤波器进行波形成形,其参数分别为滚降系数 0.5,延迟 3,升采样率 8. 对成形后的信号进行归一化处理,使得输出采样值的最大包络值为 1,并进行峰值回退 PBO 处理, PBO 值为 0.98.

仿真实验中,设 LUT 的大小 N 为 64;对于滤波器矩阵,其行数由 N 确定,而列数 N_{FIR} 设为 4,另外, FIR 滤波器长度 L 设为 4.

自适应更新 PD 系数的步长设置如下:对 LUT, $\delta(6)$ 为 0.1;对滤波器矩阵中 FIR 滤波器更新,设其自适应步长 $\mu(7)$ 为 0.01.

PD 初始化如下: LUT 表项中的内容初始化为 1, FIR 滤波器的冲激响应初始化为单位脉冲.

仿真采用文献^[8]中的更新方法,即开始时先用有限采样点仅对非线性子系统进行更新(本次实验采用 500 个采样点),然后对线性子系统进行更新,同时更新非线性子系统. 图 3 是本文提出的 PD 级联 PA 系统的均方误差(MSE, E_{ms}) 曲线,本文提出的 PD 记为“LFM”. 与传统的 Hammerstein 预失真器(简记为 H-PD)相比,其系统误差减小了大约 7 dB. 需要指出的是:仿真实验中, H-PD 中滤波器长度 L 为 16;为了能够清晰地对比各方法的效果,对本文中的 MSE 曲线进行了平滑处理.

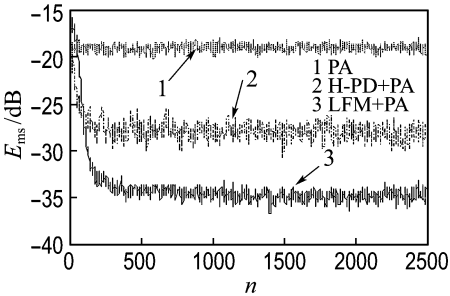


图 3 LFM+PA 与 H-PD+PA 系统的 MSE 曲线
Fig. 3 The MSE curves of LFM+PA and H-PD+PA systems

为了进一步节省存储空间及简化运算量,令 $r_n = \frac{|z(n) - z(n-1)|}{|z(n)|}$, 即仅考虑当前输入数据和前一时刻输入数据,该方法记为“xLFM”. 文献^[8]提出的 FLUT 因只考虑当前输入对线性系统的影响,可以看作是 LFM 或 xLFM 的一个特例. 图 4 为带有 3 个不同 PD 的 PA 系统的 MSE

曲线,仿真中 FLUT 的滤波器长度 L 为 8.

由图 4 可以看出:(1)3 种预失真系统的 MSE 曲线均低于传统 H-PD 系统的 MSE 曲线,说明考虑滤波器参数向量与输入序列有关的合理性;(2)xLFM+PA 和 LFM+PA 系统的 MSE 曲线都低于 FLUT+PA 系统 MSE 曲线,说明考虑更多的输入数据对滤波器的影响的合理性,以及 r_n 定义的合理性.同时,需要注意到的两点是:(1)xLFM+PA 和 LFM+PA 系统的 MSE 曲线几乎重合;(2)本文提出的 xLFM+PA 和 LFM+PA 系统在初始阶段误差较 FLUT+PA 系统大,且收敛速度也受到了一定的影响.第 1 个现象出现的原因是,采用的 PA 模型仅两个记忆长度,记忆效应不强,且训练序列长度足够长;第 2 个现象出现的原因是,xLFM+PA 和 LFM+PA 系统中滤波器组很难经过较少的迭代被全部更新到,因此收敛速度略慢一些.

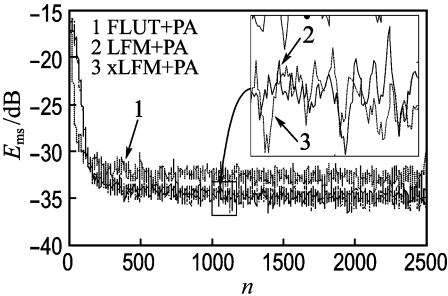


图 4 不同 PD+PA 系统的 MSE 曲线
Fig. 4 The MSE curves of different PD+PA systems

用于仅更新非线性系统的采样点数目多少对仿真结果也有影响.当采样点较少时,以 100 个采样点为例,xLFM+PA 和 LFM+PA 系统的 MSE 曲线如图 5 所示.由图 5 可以看出训练次数对 xLFM 的影响比较大,也就是说 LFM 对 PA 逆特性的跟踪能力较 xLFM 的强.

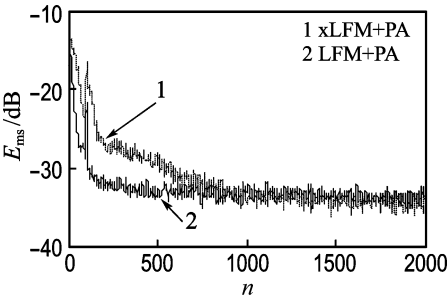


图 5 两种 PD+PA 系统的 MSE 曲线
Fig. 5 The MSE curves of two kinds of PD+PA systems

图 6 为下列信号的功率谱密度(PSD, D_{ps})曲线:(1)输入信号;(2)只经过功率放大器输出的信号;(3)带各种 PD 的 PA 输出信号.从图中可以看出,LFM 对边带的压缩效果最好,xLFM 略次于 LFM,但两者都显然优于 FLUT 和传统 H-PD.

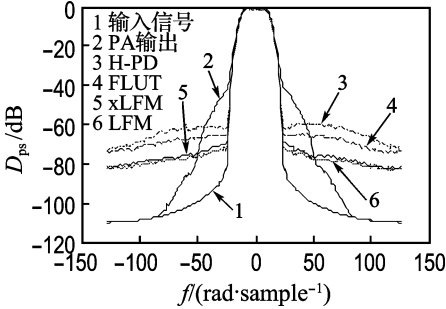


图 6 各系统的 PSD 曲线
Fig. 6 The PSD curves of different systems

表 1 给出了 H-PD、FLUT 和 LFM(xLFM)模型复杂度以及每次迭代更新所需要计算参数个数的比较,其括号内的数值是根据本文仿真实验中各预失真器参数的具体取值得到的.由此表可以看出,本文提出的 Hammerstein 预失真器虽然减少了每次迭代所需更新的参数个数,但却增加了需要更新的表项个数,较大地增加了模型参数个数.因此,本文预失真器精度的提高是以增加模型的复杂度和存储单元的个数为代价的.

表 1 各预失真器对比表
Tab. 1 The comparative table of different PDs

预失真器	更新参数 个数/迭代	表项个数	参数个数
H-PD	$1+L$ (17)	$N+1$ (65)	$N+L$ (80)
FLUT	$1+L$ (9)	$2N$ (128)	$N(1+L)$ (576)
LFM	$1+L$ (5)	$N(N_{\text{FIR}}+1)$ (320)	$N(1+N_{\text{FIR}}L)$ (1 088)

仿真实验证明:对 FLUT 线性子系统的改进,使新得到的 Hammerstein 预失真器能够有效地补偿带记忆效应功率放大器的非线性失真.在系统要求不苛刻的情况下,可以采用本文提出的预失真器 xLFM.

4 结 语

预失真器建模的精确度是直接影响对带记忆

效应功率放大器非线性失真补偿的关键因素之一,尤其是模型对功率放大器逆记忆特性的描述能力.本文提出的改进的 Hammerstein 预失真器以 LUT 级联滤波器矩阵作为其实现形式,更精确地描述了 PA 的逆记忆效应特性,提高了系统的整体性能.仿真实验证明:本文提出的 PD 能更加有效地补偿带记忆效应 PA 的非线性失真.在保证对 PA 线性化性能的前提下,提出较简化的 Hammerstein 预失真器实现形式是今后研究的方向.

参考文献:

- [1] HE Zhi-yong, GE Jian-hua, GENG Shu-jian, *et al.* An improved look-up table predistortion technique for HPA with memory effects in OFDM systems [J]. **IEEE Transactions on Broadcasting**, 2006, **52**(1):87-91
- [2] 崔 华. 基于 BPNN 的 OFDM 系统的 HPA 预失真 [J]. 电子与信息学报, 2009, **31**(6):1451-1454
- [3] CHOI Sung-ho, JEONG Eui-rim, LEE Y H. Adaptive predistortion with direct learning based on piecewise linear approximation of amplifier nonlinearity [J]. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, 2009, **57**(5):1119-1128
- [4] HAMMI O, GHANNOUCHI F M. Twin nonlinear tow-box models for power amplifiers and transmitters exhibiting memory effects with application to digital predistortion [J]. **IEEE Microwave and Wireless Components Letters**, 2009, **19**(8):530-532
- [5] RAWAT M, RAWAT K, GHANNOUCHI F M. Adaptive digital predistortion of wireless power amplifiers/ transmitters using dynamic real-valued focused time-delay line neural networks [J]. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, 2010, **58**(1):95-104
- [6] DENNIS R M, MA Z, KIM J. A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifier [J]. **IEEE Transactions on Signal Processing**, 2006, **54**(10):3852-3860
- [7] HAMMI O, GHANNOUCHI F M, VASSILAKIS B. A compact envelope-memory polynomial for RF transmitters modeling with application to baseband and RF-digital predistortion [J]. **IEEE Microwave and Wireless Components Letter**, 2008, **18**(5):359-361
- [8] JARDIN P, BAUDOIN G. Filter lookup table method for power amplifier linearization [J]. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 2007, **56**(3):1076-1087
- [9] MKADEM F, BOUMAIZA S. Extended Hammerstein behavioral model using artificial neural networks [J]. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, 2009, **57**(4):745-751
- [10] 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(自然科学版), 2009, **48**(1):47-50
- [11] AI Bo, YANG Zhi-xing, PAN Chang-yong, *et al.* Analysis on LUT based predistortion method for HPA with memory [J]. **IEEE Transactions on Broadcasting**, 2007, **53**(1):127-131

A Hammerstein predistorter based on filter matrix

SI Xiu-jie*, JIN Ming-lu, LIU Wen-long

(Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The accuracy of predistorter modeling, especially the description capability for inverse memory characteristics of power amplifier (PA), is one of the key factors to efficiently compensate the nonlinear distortion of PA with memory effects. In order to solve the problem that the varied descriptions of predistorter models for inverse memory effects of PA are not sufficient, an improved Hammerstein predistorter which consists of a lookup table and a filter matrix is proposed. The proposed predistorter can describe the inverse memory characteristics of a PA more adequately. Simulation results show that the proposed predistorter can effectively reduce the mean square error of the system, restrain spectrum from expanding efficiently, thus achieve a good linearization for the PA with memory effects.

Key words: memory effects; predistorter model; Hammerstein predistorter; filter matrix