

一种新的用于有记忆功放的查找表预失真器

张 钦, 吴嗣亮, 李 海

(北京理工大学雷达技术研究所, 北京 100081)

摘 要: 针对有记忆非线性功放提出了一种新的基于查找表的记忆型预失真器. 该记忆型预失真器采用无记忆预失真器的级联扩展, 其横向滤波器结构相比记忆多项式方法降低了复杂度, 却能够得到与其相近的线性化效果. 并且针对查找表固有的量化误差大和自适应收敛速度慢的缺点, 分别采用线性内插和加权窗迭代更新的方法加以改进. 在非线性功放的记忆多项式模型下, 通过多载波 WCDMA 宽带信号和 OFDM 宽带信号验证了基于查找表的记忆型预失真器的良好线性化效果和改进方法的有效性.

关键词: 功放线性化; 预失真器; 查找表; 有记忆功放

中图分类号: TN919.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 09-1728-05

A New Look-Up-Table Predistorter for Power Amplifier with Memory Effects

ZHANG Qin, WU Si-liang, LI Hai

(Radar Research Lab, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A new look-up-table memory predistorter for power amplifier with memory effects is proposed. The cascade extension of the memoryless predistorter and the structure of finite-impulse-response filter significantly reduce the complexity compared to memory polynomial methods, whereas they can get the close performance. Two improved methods, linear insertion and iteration with weights' windows, are also discussed to solve quantization distortions and convergence speed problems respectively, which are introduced intrinsically by look-up-table method. Under power amplifier's memory polynomial model, simulation results of multi-carriers WCDMA wideband signal and OFDM wideband signal show excellent performance of the look-up-table memory predistorter and the efficiency of the two improved methods.

Key words: amplifier linearization; predistorter; look-up-table; power amplifier with memory effects

1 引言

功率放大器的工作效率和线性度存在着固有矛盾. 高功效必然会降低功放线性度, 引起非线性失真. 宽带接入和多载波系统具有很高的峰值均值比, 对功放线性度提出了更高的要求, 线性化技术就显得尤为重要, 其中基带预失真线性化技术中最有效的一种方法.

基带预失真方法是在功放前放置一个预失真器, 用来补偿功放的非线性特性. 预失真器通常可以分为基于多项式和基于查找表两类. 基于多项式的预失真器易于补偿深度压缩的功放特性, 但是由于多项式阶数的限制, 预失真器的应用局限于对特性曲线较规则的功放进行线性化. 基于查找表的预失真器能够跟踪各种功放特性曲线, 但是由于查找表的大小限制, 会引入量化失真, 加大查找表又会导致收敛速度过慢^[1].

传统的预失真器多是无记忆功放提出的, 已经

不适于目前的宽带或多载波发射机, 带宽的增加使得功放的记忆性不能再被忽略. 文献[2~4]提出了基于记忆多项式的预失真器, 可以有效地校正有记忆功放的非线性, 但是此类预失真器提高了对多项式项数的要求, 增加了计算难度, 不易实现. 文献[5~6]改进了无记忆查找表预失真器, 分别构造成二维查找表预失真器和分段预均衡器. 二维查找表预失真器通过增加短时功率作为第二维查找参量, 使之具有了一定记忆性, 但是短时功率统计量对记忆性的表征比较模糊, 尤其在功放记忆性较强时, 二维查找表预失真器的线性化效果不理想. 并且二维查找表预失真器在二维搜索中都会受到量化误差的影响, 加大二维查找表, 存储量会平方倍的增长. 分段预均衡器将若干查找表进行组合, 使预失真器具有很强的记忆性, 增加的存储量有限, 只与实现的记忆深度有关, 但是其等效的多项式模型各项系数之间存在相关性, 线性化效果在一定程度上受到限制. 文献[7,8]在

无记忆预失真器前级联了横向滤波器,使预失真器的输入具有一定记忆性,但此记忆性会受到分辨率的限制,而且只有在 Winner-Harmerstein 功放模型下才能获得最佳线性化效果,不具普适性。

本文以功放的记忆多项式模型为基础,提出了一种新的基于查找表的记忆型预失真器,具有简单的横向滤波器结构,经过理论推导证明其等效于记忆多项式预失真器,并且仿真验证了其良好的线性化效果,通过复杂度估计,表明了基于查找表的记忆型预失真器易于实现。同时利用线性内插可以减小查找表预失真器量化失真,本文又提出了利用加权窗迭代更新提高自适应收敛速度的新方法。

2 有记忆功放模型

线性化有记忆功放需要建立精确的功放模型。Volterra 级数常被用来建模有记忆功放,它的离散形式表示为

$$y(n) = \sum_{k=1}^K y_k(n) \quad (1)$$

其中

$$y_k(n) = \sum_{m_1=0}^{M-1} \dots \sum_{m_k=0}^{M-1} h_k(m_1, \dots, m_k) x(n - m_l) \quad (2)$$

h_k 称为 Volterra 内核, k 为 Volterra 级数的维数, M 表示记忆深度。Volterra 级数计算复杂,实际中需要简化该模型。令 Volterra 内核 h_k 除对角线外均为零值,则功放模型重新表示为

$$y(n) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=0}^{M-1} h_{k,m} x^k(n-m) \quad (3)$$

由文献[4,9]可知,式(3)对应的功放复基带模型为

$$y(n) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=0}^{M-1} h_{k,m} x(n-m) |x(n-m)|^{k-1} \quad (4)$$

式(4)称为功放的记忆多项式模型,它能够准确表征实际功放的特性^[2,10]。

预失真器的特征函数为非线性功放特征函数的逆函数。记忆多项式的逆函数可以用另一个记忆多项式来逼近^[10],因此预失真器同样应该是基于记忆多项式模型。

3 基于查找表的基带预失真

3.1 基带预失真结构

基带预失真分为直接求 Volterra 级数逆函数法和自适应预失真法两种。运用 p 阶求逆算法可以获得 Volterra 级数的逆函数,但是计算复杂,实时性差,不适用于宽带系统^[4,11]。图 1 所示的自适应预失真结构采用两个相同的失真器,分别置于功放输入端和输出端。功放的输出通过滞后失真器预测其输入数据,自适应地更新失真器的参数。

自适应算法调节滞后失真器,使之与功放级联后形成线性系统。文献[4]、[12]证明,在功放输入端放置一个与滞后失真器相同的预失真器,发射链路能够被校准成为线性系统。

3.2 基于查找表的记忆型预失真器

传统的基于查找表的预失真器无法校正有记忆功放的非线性。本文针对有记忆功放提出基于查找表的记忆型预失真器,如图 2 所示。记忆型预失真器是多个查找表预失真器的延时级联,也可以视为是横向滤波器,滤波器系数由输入数据幅值查表而得。

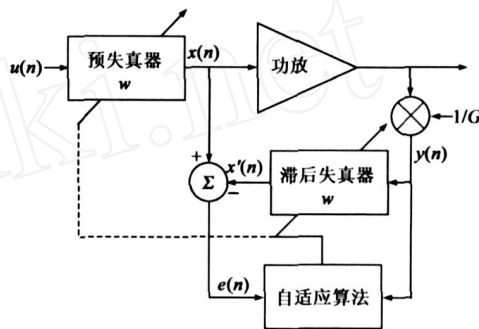


图 1 自适应预失真结构

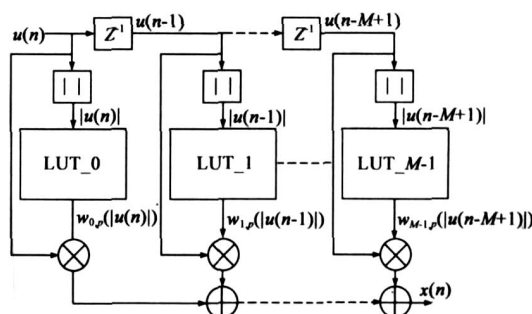


图 2 基于查找表的记忆型预失真器

M 个查找表中权系数的更新利用 LMS 算法:

$$W_{p+1}(n) = W_p(n) + \mu Y^*(n) e(n) \quad (5)$$

其中 p 表示迭代次数, $W_p(n) = [w_{0,p}(|y(n)|), w_{1,p}(|y(n-1)|), \dots, w_{M-1,p}(|y(n-M+1)|)]^T$, $Y(n) = [y(n), y(n-1), \dots, y(n-M+1)]$, $e(n) = x(n) - W_p(n) Y^T(n)$ 。

为使分析方便,传统的基于查找表的预失真器由多

项式 $x(n) = \sum_{k=1}^K b_k u(n) |u(n)|^{k-1}$ 表示^[5], 其能够逼近无记忆功放多项式模型的逆函数。则图 2 中的预失真器可以表示为

$$\begin{aligned} x(n) &= \sum_{k=1}^K b_{0,k} u(n) |u(n)|^{k-1} + \sum_{k=1}^K b_{1,k} u(n-1) |u(n-1)|^{k-1} \\ &+ \dots + \sum_{k=1}^K b_{M-1,k} u(n-M+1) |u(n-M+1)|^{k-1} \\ &= \sum_{k=1}^K \sum_{m=0}^{M-1} b_{m,k} u(n-m) |u(n-m)|^{k-1} \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)恰好为记忆多项式,能够逼近式(4)所示的功放记忆多项式模型的逆函数.而且从式(6)可以看出,图2中的预失真器等效于图3所示的基于多项式的多支路预失真器^[3],由此可以证明本文提出的基于查找表的记忆型预失真器的有效性.

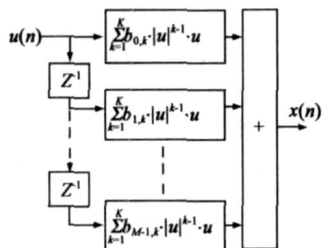


图3 基于多项式的多支路预失真器

3.3 基于查找表预失真器的改进技术

基于查找表的预失真器存在两大缺点:量化失真和自适应收敛速度慢.级联多个查找表的记忆型预失真器,在这两个方面的不足更为突出.本文针对量化失真,采用内插值的方法进行补偿,对于收敛速度慢提出采用加权窗迭代更新的方法进行改善.

内插值的方法可以有效地补偿由于幅度量化产生的误差.常用的内插方法有线性内插和拉格朗日多项式内插.线性内插实现简单,易于实时计算.线性内插值由式(7)得到

$$w_m(|u|) = \frac{|u_2| - |u|}{|u_2| - |u_1|} w_m(|u_1|) + \frac{|u| - |u_1|}{|u_2| - |u_1|} w_m(|u_2|) \quad (7)$$

其中输入幅度 $|u|$ 处于查找表的 $(|u_1|, |u_2|)$ 幅度范围内.

基于查找表的预失真器收敛速度慢主要由于自适应算法每次只针对查找表中的一个幅值点进行更新.采用加权窗迭代更新方法,自适应算法每次的更新值乘以不同权系数更新查找表中不同幅值点的数值.加权窗迭代更新方法由式(8)表示

$$w_{m,p+1} = w_{m,p} + \mu \cdot y^*(n-m) \cdot e(n) \quad (8)$$

其中 p 为迭代次数, μ 为宽度 $2k+1$ 的加权窗 $[\mu_0, \dots, \mu_{k-1}, \mu_k, \mu_{k+1}, \dots, \mu_0]$, 为量化台阶, $w_{m,p} = [LUT_m(|y(n-m)| -), LUT_m(|y(n-m)|), LUT_m(|y(n-m)| +)] \dots$. 由式(8)可见,每次自适应迭代均对查找表内 $2k+1$ 个值进行更新.

加权窗可以选择各种衰减权值矢量,式(9)和式(10)分别表示指数衰减权值矢量和线性衰减权值矢量.

$$\mu = [D^{-k}, \dots, D^{-1}, D^0, D^{-1}, \dots, D^{-k}] \quad (9)$$

$$\mu = [1-k \cdot D, \dots, 1-D, 1, 1-D, \dots, 1-k \cdot D] \quad (10)$$

4 仿真结果

本文以 WCDMA 双载波宽带信号和 OFDM 宽带信号为例,通过观察功率谱特性,比较基于查找表的记忆型预失真器、基于查找表的无记忆型预失真器、分段预

均衡器^[6]和基于多项式的多支路预失真器^[3]的线性化效果.

仿真中非线性功放选用式(4)所示的记忆多项式模型,系数为^[2,5]:

$$\begin{aligned} h_{10} &= 1.0513 + 0.0904j & h_{30} &= -0.0542 - 0.2900j \\ h_{50} &= -0.9657 - 0.7028j \\ h_{11} &= -0.0680 - 0.0023j & h_{31} &= -0.2234 + 0.2317j \\ h_{51} &= -0.2451 - 0.3735j \\ h_{12} &= 0.0289 - 0.0054j & h_{32} &= -0.0621 - 0.0932j \\ h_{52} &= 0.1229 + 0.1508j \end{aligned}$$

基于查找表的记忆型预失真器中的查找表大小分别为 64 和 256,记忆深度为 3 级.采用线性内插补偿查找表的量化误差.基于多项式的多支路预失真器采用 3 支路 9 阶多项式,其已经能够很好的逼近上述非线性功放特征函数的逆函数,继续增大支路和多项式阶数,线性化性能改善不明显.

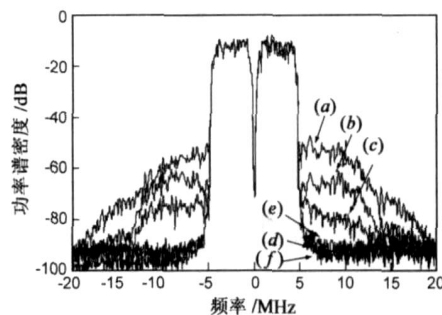


图4 WCDMA 双载波宽带信号功率谱密度 (a)无预失真器;(b)无记忆查找表预失真器;(c)分段预均衡器;(d)基于多项式的多支路预失真器;(e)基于查找表大小 64 的记忆型预失真器;(f)基于查找表大小 256 的记忆型预失真器

图4示出了各预失真器对 WCDMA 双载波信号的线性化效果.从图4中可以看出,记忆型功放的非线性会引起严重的邻道干扰.传统的基于查找表的无记忆型预失真器对有记忆功放的线性化效果十分有限.分段预均衡器由于各查找表的查找地址均采用当前输入值的模值,导致其等效的多项式系数彼此相关,无法完全逼近非线性功放特征函数的逆函数,故线性化效果不甚理想.基于查找表的记忆型预失真器与基于多项式的多支路预失真器均能得到良好的线性化效果,增加查找表的大小,基于查找表的记忆型预失真器性能更优.因此,在功放的记忆多项式模型下,基于查找表的记忆型预失真器可以得到最佳的线性化效果.表1给出了 WCDMA 双载波宽带信号通过各预失真器后的第一邻道功率比(ACPR1)和第二邻道功率比(ACPR2)的改善情况.

图5是 DVB-T 的 2K 模式 OFDM 宽带信号通过各预失真器后的线性化效果曲线.基于多项式的多支路预失真器和基于查找表的记忆型预失真器均得到了最佳效果.DVB-T 宽带信号通过各预失真器后的功率谱密度特

性如表 2 所示.

表 1 WCDMA 双载波宽带信号通过各预失真器后的邻道功率比

预失真器	无预失真器	无记忆查找表预失真器	分段预均衡器	基于多项式的多支路预失真器	基于查找表大小 64 的记忆型预失真器	基于查找表大小 256 的记忆型预失真器
ACPR1	- 39. 5dBc	- 52. 4dBc	- 63. 1dBc	- 73. 4dBc	- 74. 1dBc	- 75. 3dBc
ACPR2	- 48. 8dBc	- 59. 5dBc	- 70. 9dBc	- 78. 5dBc	- 77. 5dBc	- 80. 2dBc

表 2 DVB-T 宽带信号通过各预失真器后的功率谱密度

预失真器	无预失真器	无记忆查找表预失真器	分段预均衡器	基于多项式的多支路预失真器	基于查找表大小 64 的记忆型预失真器	基于查找表大小 256 的记忆型预失真器
频偏 4. 2MHz	- 40. 1dBc	- 53. 4dBc	- 58. 6dBc	- 72. 1dBc	- 71. 1dBc	- 73. 9dBc
频偏 6MHz	- 47. 9dBc	- 55. 6dBc	- 62. 4dBc	- 76. 9dBc	- 73. 3dBc	- 79. 8dBc

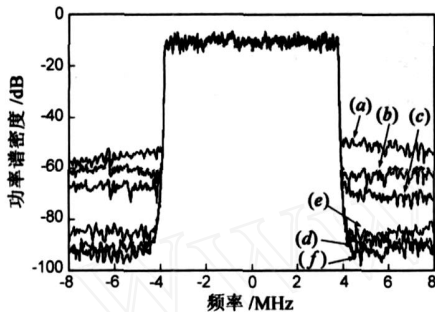


图 5 OFDM 宽带发射信号功率谱密度 (a)无预失真器;(b)无记忆查找表预失真器;(c)分段预均衡器;(d)基于多项式的多支路预失真器;(e)基于查找表大小 64 的记忆型预失真器;(f)基于查找表大小 256 的记忆型预失真器

表 3 列出了线性内插对于查找表的量化噪声的改善情况. 在自适应算法收敛后, 查找表大小 64, 采用线性内插得到的最小均方误差 (MSE) 相当于不采用内插补偿的 256 大小的查找表. 查找表减小不仅对存储量的要求变低, 而且可以提高收敛速度. 图 6 中绘出了基于查找表的记忆型预失真器采用指数衰减权值矢量 $D = 1$ 时和线性衰减权值矢量 $D = 1/6$ 时迭代更新的均方误差收敛曲线, 相比非加权窗迭代更新, 收敛速度得到明显提高. 权值矢量衰减缓慢, 使查找表 MSE 收敛变快, 但是收敛后 MSE 波动会变大. 实际工程中可以在自适应迭代的不同阶段, 选用不同衰减速度的权值矢量, 兼顾收敛速度和收敛稳定度.

表 3 查找表的量化噪声

预失真器	64、无内插	128、无内插	256、无内插	64、线性内插	256、线性内插
MSE	- 35. 9dB	- 41. 4dB	- 47. 5dB	- 48. 5dB	- 58. 6dBc

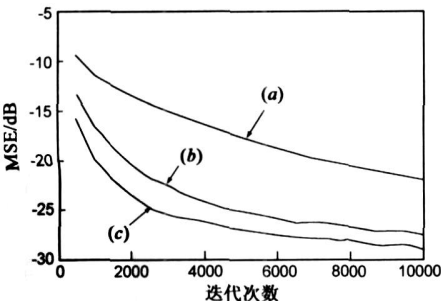


图 6 均方误差收敛特性 (a)非加权窗迭代更新;(b)指数衰减权值矢量迭代更新;(c)线性权值矢量迭代更新

5 复杂度分析

基于查找表的记忆型预失真器和基于多项式的多支路预失真器在功放的记忆多项式模型下均可以得到最佳的线性化效果, 表 4 中给出了两种预失真器的计算复杂度估计, 其中忽略查找表读、写等逻辑操作, 加、乘法均指实数运算. L 表示查找表级数, M 和 K 分别代表多项式的支路数目和阶数.

仿真中采用的记忆深度为 3, 大小为 64 的基于查找表的记忆型预失真器, 在预失真过程中需用 10 次加法和 12 次乘法, 在自适应过程中需用 24 次加法和 24 次乘法. 而 3 支路 9 阶预失真器在预失真过程中需用 58 次加法和 81 次乘法, 在自适应过程中需用 174 次加法和 222 次乘法. 可以看出基于查找表的记忆型预失真器明显的降低的计算复杂度, 更易于实现.

表 4 预失真器计算复杂度估计

预失真器	预失真		自适应迭代更新	
	加法	乘法	加法	乘法
基于查找表的记忆型预失真器	$4L - 2$	$4L$	$8L$	$8L$
基于多项式的多支路预失真器	$2MK + 2M - 2$	$3MK$	$6MK + 4M$	$8MK + 2M$

6 结论

本文提出了一种新的基于查找表的记忆型预失真器, 在非线性功放的记忆多项式模型下, 仿真比较了其与传统预失真器、分段预均衡器和基于多项式的多支路预失真器的线性化效果, 可以验证基于查找表的记忆型预失真器能够很好地抑制有记忆功放的非线性失真. 加权窗更新的方法提高了预失真器快速跟踪功放特性变化的能力, 内插算法降低对查找表大小的要求, 使得基于查找表的记忆型预失真器更易于在宽带信号发射系统中实现.

参考文献:

[1] H H Chen, C H Lin, P C Huang, Joint polynomial and look-up-table predistortion power amplifier linearization [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems —II: express briefs, 2006,

- 53(8) :612 - 616.
- [2] L Ding , G T Zhou , D R Morgan. A robust digital baseband predistorter constructed using memory polynomials [J]. IEEE Transactions on Communication, 2004, 52(1) :159 - 165.
- [3] M Helaoui, S Boumaiza, A Ghazel. Power and efficiency enhancement of 3G multicarrier amplifiers using digital signal processing with experiment validation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(4) :1396 - 1404.
- [4] D R Morgan, Z X Ma, J Y Kim. A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(10) :3852 - 3860.
- [5] He Z Y, Ge J H, Geng S J. 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.
- [6] W J Kim, K J Cho, S P Stapleton. Piecewise pre-equalized linearization of the wireless transmitter with a doherty amplifier [J]. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(9) :3469 - 3478.
- [7] 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.
- Wang Yong, Xiang Xin, Yi Ke-chu. Memory predistorter in wideband OFDM system [J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(9) :1456 - 1459. (in Chinese)
- [8] 王勇, 向新, 易克初. 基于多项式的记忆型数字基带预失真器 [J]. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(2) :223 - 226.
- Wang Yong, Xiang Xin, Yi Ke-chu. Memory digital baseband predistorter based on a polynomial [J]. Journal of XiDian University, 2006, 33(2) :223 - 226. (in Chinese)
- [9] S Benedetto, E Biglieri. Principles of digital transmission with wireless applications [M]. New York: Kluwer Academic/Plenum, 1999. 69 - 75.

- [10] J Kim, K Konstantinou. Digital predistortion of wideband signals based on power amplifier model with memory [J]. Electronics Letters, 2001, 37(23) :1417 - 1418.
- [11] C S EUN, P J Edward. A new volterra predistorter based on the indirect learning architecture [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(1) :223 - 227.
- [12] M Schetzen. The volterra and wiener theories of nonlinear systems [M]. New York: Wiley, 1980.

作者简介:



张 钦 男, 1981 年生于北京, 现为北京理工大学博士研究生, 研究方向为移动通信系统及信号处理.
E-mail: zqbit @bit. edu. cn



吴嗣亮 男, 1964 年出生, 现为北京理工大学教授、博士生导师, 中国电子学会高级会员, 目前主要研究方向为现代信号处理的理论与应用、雷达系统理论与技术、电子系统仿真与信号模拟等.
E-mail: siliangw @bit. edu. cn



李 海 男, 1972 年出生于浙江, 现为北京理工大学副研究员, 目前主要研究方向为系统仿真与数字集群通信系统.
E-mail: haili @bit. edu. cn