

基于 LUT 的 HPA 数字基带预失真方法研究

艾 渤^{①②} 杨知行^① 潘长勇^① 张涛涛^① 阳 辉^①

^①(清华大学电子工程系微波与数字通信国家重点实验室 北京 100084)

^②(西安武警工程学院通信工程系 西安 710086)

摘 要: 该文深入研究了 OFDM 系统中基于查询表 LUT 方法的 HPA 数字预失真技术。针对传统 LUT 方法收敛速度非常慢的不足,有关文献提出了相应的改进措施。该文从误码率 BER,功率谱密度 PSD 和算法收敛速度几个方面进行了算法性能的仿真比较分析,指出以上算法存在的不足,并提出了新的改进方法,仿真及分析结果表明了该文提出改进方法在性能上的优越性。

关键词: 正交频分复用; 高功率放大器; 数字基带预失真; 查询表

中图分类号: TN919.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)07-1580-04

Research on HPA Digital Base-band Pre-distortion Technique Based on Look-up Table Method

Ai Bo^{①②} Yang Zhi-xing^① Pan Chang-yong^① Zhang Tao-tao^① Yang Hui^①

^①(State Key Lab on Microwave & Digital Communications, Dept. of E&E, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

^②(Dept. of Telecommunications Engineering, Engineering College of Armed Force Police, Xi'an 710086, China)

Abstract: This paper focus on the research of LUT based digital pre-distortion techniques in OFDM systems. The defects of the conventional LUT based pre-distortion techniques are pointed out with the improved method proposed. The performance of the algorithms are compared and analyzed in terms of BER, PSD and the convergence speed. Simulation results and analysis demonstrate the better performance of the proposed method.

Key words: OFDM; High Power Amplifier (HPA); Digital base-band pre-distortion; Look-up table

1 引言

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)已被公认为是第四代移动通信的核心技术,OFDM及其相关技术应用十分广泛,现已被多个标准所采纳^[1, 2]。然而,OFDM技术存在两个主要缺点:对载波频偏十分敏感^[3]以及高的峰平比PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)^[4],后者要求功率放大器必须具有较大的线性范围,否则将会导致信号的非线性失真。在实际应用中避免系统出现非线性失真的简单方法就是增加高功率放大器HPA的输出回退OBO (Out Back-off),但由于OFDM信号的高峰平比特性,所需的输出回退会很大,这将造成HPA工作效率的降低。因此对于OFDM系统而言,在不明显降低HPA工作效率的同时如何有效地进行线性放大是一个重要的问题。

另一方面,在第三代及以后的第四代无线移动通信系统中,对手持移动终端的要求是更加的智能化、多样化、个性化服务以及方便携带,这就对手机终端的电池容量要求很苛刻,从目前可多次充电电池的技术来看,基本上不可能在电量储备上有特别大的突破,这样,就要求功率放大器必须有很高的功率效率。总之,为解决上述这些矛盾,就要让放大器既线性又高效的工作,即对射频放大器或射频系统提出了

线性化处理的要求,发展射频放大器线性化技术,采用各种手段和方法来实现放大器高效率而又高线性度的工作,这一点,对于未来无线移动通信技术的发展和实现有着十分重大的实际意义。

HPA线性化技术所要解决的主要问题是:降低邻道干扰(带外失真);减小带内损耗,提高放大器功效。目前关于HPA的线性化有许多方法:功率回退技术、包络消除和恢复技术、笛卡尔环路后馈技术、前馈线性化技术、非线性器件线性化技术以及数字预失真技术^[5, 6]等。各种技术都有其优缺点,其中的数字预失真方法以:无稳定性问题、精度较高、适用宽带通信、很强的自适应能力等优点前景最被看好。

2 HPA 数学模型

关于HPA的数学分析,截止目前已有许多模型,总体上可分为两类:有记忆^[7]和无记忆模型^[8,9];当输入信号的带宽较小,记忆的时常数小于信号最大包络频率的倒数时,就可将功率放大器认为是无记忆的系统。在无记忆模型中,广为使用的有:针对行波管高频放大器TWTA(Traveling Wave Tube Amplifier)的Saleh模型^[8]和主要针对固态功率放大器SSPA(Solid State Power Amplifier)的特性发展而来Rapp模型^[9]。SSPA的幅度和相位失真相对TWTA较小,多数情况下的相位失真可认为是0。因为本文的研究重点在于基于LUT

的预失真算法研究,因此本文采用相对简单的无记忆TWTA模型^[9]来进行分析。

若 HPA 的输入信号为:

$$x(t) = \rho(t) \exp[j\varphi(t)] \quad (1)$$

则 HPA 的输出信号可表示为:

$$z(t) = A[\rho(t)] \exp[j(\varphi(t) + \Phi[\rho(t)])] \quad (2)$$

其中 $A(\rho)$ 和 $\Phi(\rho)$ 分别代表 HPA 非线性的幅度 AM-AM 和相位 AM-PM 畸变, $\rho(t)$ 为 HPA 的输入电压。

$$A[\rho(t)] = A_{\text{sat}}^2 \frac{\rho^2(t)}{\rho^2(t) + A_{\text{sat}}^2} \quad (3)$$

$$\Phi[\rho(t)] = \frac{\pi}{3} \frac{\rho^2(t)}{\rho^2(t) + A_{\text{sat}}^2} \text{(rad)} \quad (4)$$

A_{sat} 表示放大器的输入饱和电压。

图 1 给出了 Rapp 的 TWTA 模型^[8]特性曲线仿真图,其中的输出回退 OBO=4.17dB。本文后面的仿真分析都是以此模型为基础的。

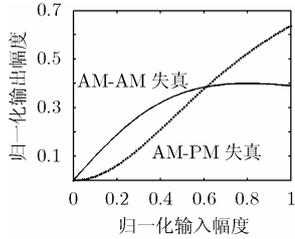


图1 TWTA 特性曲线

3 常规 LUT 及改进方法

预失真线性化技术既可在基带,也可在射频范围实现。射频预失真技术的电源效率高,成本低,但由于使用非线性射频器件,使其控制和调整都相对困难;而基带预失真技术不涉及难度较大的射频信号处理,便于利用现代数字信号处理技术来处理信号,所以目前更倾向于基带预失真技术。数字基带查询表预失真技术(LUT)^[10]是目前最为流行的线性化预失真技术,该法可以应用于任何增益波形图的功率放大器,线性化效果好。

3.1 常规LUT预失真算法^[11,12]

图 2 是 LUT 预失真算法的简单框图:

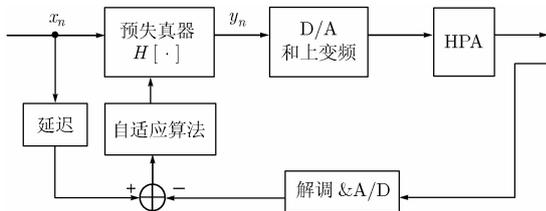


图2 简化的 LUT 预失真算法框图

其中的 $x_n = \rho_n e^{j\varphi_n}$, $y_n = r_n e^{j\theta_n}$, $z_n = R_n e^{j\psi_n}$, $H[\cdot]$ 表示预失真器的传输函数。由式(1),式(2)可得: $R_n = A[r_n]$; $\phi_n = \theta_n + \Phi[r_n]$, 则LUT的LMS算法估计可表示为^[11]

$$H_R[\rho_n]_{n+1} = H_R[\rho_n]_n - \alpha \left(\frac{A[r_n]}{\rho_n} - 1 \right) \quad (5)$$

$$H_\psi[\rho_n]_{n+1} = H_\psi[\rho_n]_n - \beta(\Psi_n - \varphi_n) \quad (6)$$

H_R , H_ψ 分别表示预失真器的幅度和相位信息,调节系数 α , β 决定了算法的收敛速率和稳定性。但这种迭代算法的收敛速度非常慢,并且由于OFDM符号分布特性,大幅度信号出现概率相对很小,导致其迭代次数少,也会大大影响到收敛速度。为此,相关文献提出用内插的方法来提高收敛速度^[12]。但本文中将通过仿真分析来表明内插法在通常情况下只起到“平滑”的作用,不会使收敛速度有明显改善。

3.2 常规 LUT 内插算法仿真分析

内插法如式(7),式(8)所示:

$$\hat{H}(N-n) = \left(1 - \frac{n}{L_1}\right) H(N) + \frac{n}{L_1} H(N-L_1), \quad 1 \leq n \leq L_1 - 1 \quad (7)$$

$$\hat{H}(N+n) = \left(1 - \frac{n}{L_2}\right) H(N) + \frac{n}{L_2} H(N+L_2), \quad 1 \leq n \leq L_2 - 1 \quad (8)$$

$H(N)$ 表示地址为 N 处的 RAM 表中的内容,若用 adr1 和 adr2 分别表示距离地址 N 最近且已经迭代的、小于及大于地址 N 的 RAM 表地址,则 $L_1 = N - \text{adr1}$; $L_2 = \text{adr2} - N$ 。本文考虑了有代表性的 3 种情况进行仿真分析: (1) adr1 和 adr2 为固定地址,分别代表查询表的最小值和最大值(case 1); (2) adr1 和 adr2 是随机选取的且经过迭代,即文献[12]提出的内插算法情形(case 2); (3) adr1 和 adr2 是信号出现概率较高的量化地址: 88 和 184,其在 DVB-T 标准^[1]的一个 OFDM 符号内的出现概率分别为 72 次和 35 次(case 3); (4) adr1 和 adr2 是信号出现概率较高的量化地址: 88 和 212,其在 DVB-T 标准^[1]的一个 OFDM 符号内的出现概率分别为 72 次和 24 次(case 4)。

仿真条件: 以 Matlab6.5 为仿真平台, OFDM 信号模型遵循 DVB-T 标准^[1], 每个 OFDM 符号包含 2048 个子载波; 保护间隔为 128 个子载波; 查询表大小 $\text{LUT}=450$; 功率放大器输出回退 $\text{OBO}=7.8602\text{dB}$; 迭代因子 $\alpha=0.004$; 经 50 次迭代。

由图 3(a)可看出,常规 LUT 算法在迭代 50 次后使带外干扰下降约 8dB; 而在使用了内插算法、case 1 的情况下,带外干扰抑制情况并没有好转。分析其主要原因在于: 地址 adr1 和 adr2 处的内容几乎未经过迭代,其数值基本保持为初始值 1,因此与这两处地址间的内插不会得到理想效果。在 case 2 情况下,本来要使 HPA 输出信号 $A[r_n]$ 逼近原输入信号 ρ_n ,但这种内插会使原本由式(5)逼近的迭代变为近似内插值,因此效果不好。case 3 时,内插效果较为显著,主要原因: 为节省 RAM 资源,信号 ρ_n 一般需要经过取整和量化,原信号的小数部分会被忽略。因此,在常规 LUT 算法中的最佳逼近也是原信号 ρ_n 的整数部分; 而经过内插后,某些幅值点会因内插带有小数部分而更接近原信号。但在 case 3

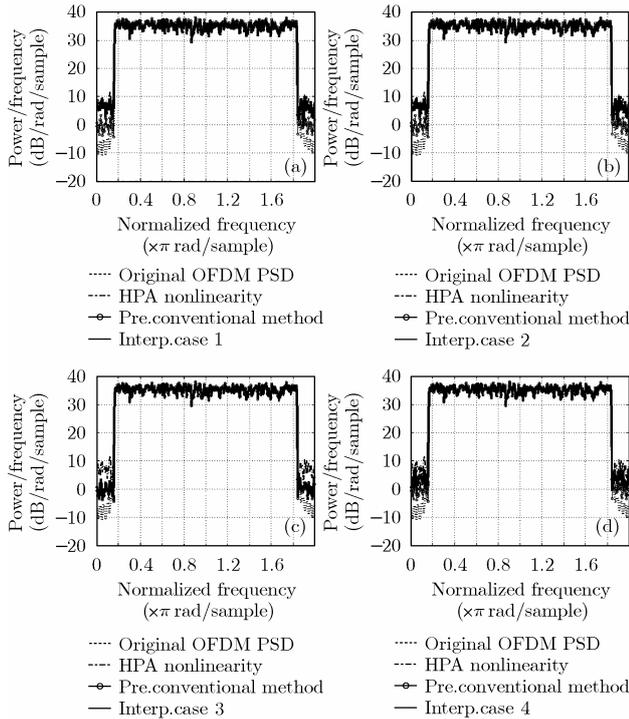


图 3 常规 LUT 算法 4 种情况下的 PSD 仿真图

情况下, 当出现概率高的两点间距较大时, 可能会出现迭代过度的问题(case 4, 如图 3(d)), 而且出现概率高的这两点间如何选择也是问题。

从 BER 仿真图 4 可以看出, 在 case 1 和 case 2 情况下, 其带内失真补偿效果很差, 补偿前后 BER 性能几乎没有有什么改变。正如前面所分析的, case 3 时的带内失真补偿效果显著, 使 BER 接近 AWGN 下的性能; 但这种情况下的内插, 在同样的迭代因子时可能会引起迭代过度, 如 case 4 所示。

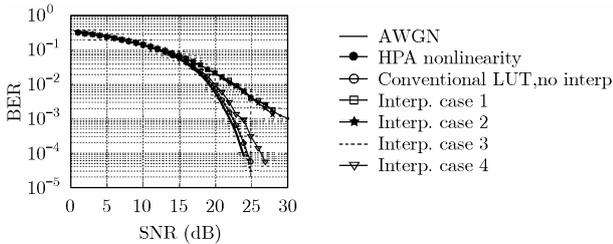


图 4 不同内插情况下的预失真 BER 仿真

通过大量仿真分析可得到如下结论: 当迭代因子较小时, 常规内插方法并不比 LUT 方法优越; 常规内插方法的优点在于: 当查询表初始值设置不当时会有一些效果; 另外, 当迭代因子过大时可防止迭代过度。

3.3 改进的 LUT 内插算法

实质上, 要大大提高收敛速度, 一般的内插方法是不能奏效的。考虑到 OFDM 符号的分布概率特性: 大幅度信号出现概率相对很小。因此, 要加快收敛就要考虑到大幅度信号。结合 OFDM 符号的分布特性, 本文的改进算法如下: 首先判断输入信号幅值 R 是否满足: $A \leq R \leq B$, 其中 A 为大幅度信号, $B = A_{\text{sat}}/2$ (A_{sat} 为功率放大器的饱和电压); 若不满足该条件, 则使用常规 LUT 方法; 若满足该条件, 则

在该幅值处更新迭代查询表中相应内容若干次, 同时在该幅值和点 A, B 之间进行内插。关于 A, B 的选取, 为提高收敛速度, A 一般选为出现概率很小的大幅度信号; 下限 B 的选取: 只有在 $B = A_{\text{sat}}/2$ 时预失真器才能得到最好效果, 其中一个主要原因是所使用的仿真模型^[9], 相关的具体分析可参考我们的前期研究^[13]。

下面利用新的改进算法进行仿真, 仿真条件: OFDM 信号模型遵循 DVB-T 标准^[1], 每个 OFDM 符号包含 2048 个子载波; 保护间隔为 128 个子载波; 查询表大小 $LUT = 450$; 功率放大器输出回退 $OBO = 7.8602 \text{ dB}$ ($A_{\text{sat}} = 700$); 迭代因子 $\alpha = 0.004$; 所有信号经 20 次迭代; 对大幅度信号经过 5 次迭代, $A = 260$ (取整后的信号幅值, 其在 DVB-T 标准^[1] 的一个 OFDM 符号内的出现概率为 6 次), 从 PSD 和 BER 两方面进行仿真对比分析。

从仿真图 5(a) 可以看出, 利用改进方法, 对大幅度信号仅经 5 次迭代, 其 PSD 带外干扰较常规 LUT 方法减少约 6 dB; 图 5(b) 给出了改进算法 BER 性能的仿真结果: 在误码率为 10^{-3} 时有 1 个多 dB 的 SNR 改善, Matlab 6.5 仿真用时约 53s。而要达到同样的效果, 使用传统 LUT 及内插方法, 需要使所有信号经 70 次迭代, 仿真用时约 142s。可见, 利用本文改进的 LUT 方法, 其收敛速度大大提高。

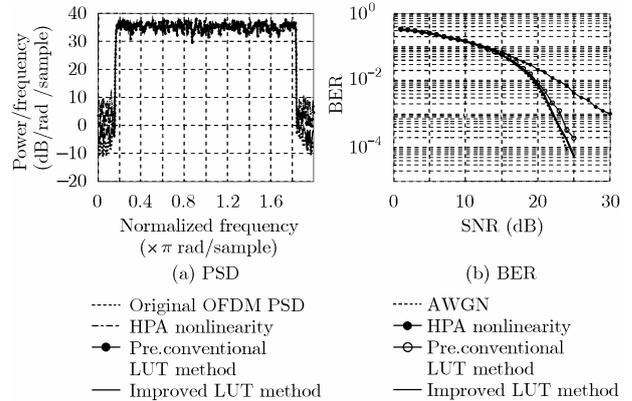


图 5 改进预失真方法的 PSD, BER 性能仿真

4 结束语

传统的数字查询表预失真方法存在着收敛速度很慢的缺点。文献[11,12]提出了利用内插方法来提高收敛速度。本文通过仿真分析表明文献[11,12]所给内插方法并不能有效提高 LUT 方法的收敛速度, 而更多地起到对数据的平滑作用, 如: 可防止因迭代因子过大而导致的迭代过度。本文提出了一种新的改进方法, 其关键点在于与 OFDM 符号的分布特性结合起来, 对出现概率相对小的大幅度信号加大迭代次数, 以使其对应 LUT 表中的内容得到及时更新, 从而大大提高了 LUT 算法的收敛速度。

参考文献

- [1] European Telecommunication Standard ETS 300 744. Digital broadcasting systems for television, sound and data

- services; Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television [S]. May 1996.
- [2] Tsinghua University. Terrestrial Digital Multimedia/Television Broadcasting System. P.R.China Patent 00123597.4 [P] filed Aug.25, 2000, issued Mar.21, 2001.
- [3] Ai B, Ge J H, and Wang Y, *et al.* Frequency offset estimation for OFDM in wireless communications [J]. *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, 2004, 50(1): 73–77.
- [4] Jayalath A D S and Tellambura C. Reducing the peak-to-average power ratio of orthogonal frequency division multiplexing signal through bit or symbol interleaving[J]. *Electronic Letters*, 2000, 36(12): 1161–1163.
- [5] Andrea D A N, Lottici V, and Reggiannini R. Efficient digital predistortion in radio relay links with nonlinear power amplifiers[J]. *IEE Proceedings–Communications*, 2000, 147(3): 175–179.
- [6] Kubo T, Fudaba N, and Ishikawa H, *et al.* A highly efficient adaptive digital predistortion amplifier for IMT-2000 base stations[C]. The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference 2003, Jeju Korea, 22-25 April 2003, vol. 4: 2206–2210.
- [7] Lei D, Zhou G T, and Morgan D R, *et al.* A robust digital baseband predistorter constructed using memory polynomials [J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2004, 52(1): 159–165.
- [8] Rapp C. Effects of HPA-nonlinearity on 4-DPSK-OFDM signal for a digital sound broadcasting system[C]. In Proc. 2nd European Conference on Satellite Communications, Liege Belgium, 1991, vol. 2: 179–184.
- [9] Saleh A and Salz J. Adaptive linearization of power amplification in digital radio systems [J]. *Bell System Technical Journal*, 1983, 62(4): 1019–1033.
- [10] Muhonen K J, Kavehrad M, and Krishnamoorthy R. Look-up table techniques for adaptive digital predistortion: A development and comparison[J]. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2000, 49(5): 1995–2002.
- [11] Zenobio D, Santella G, and Mazzenga F. Adaptive linearization of power amplifier in orthogonal multicarrier schemes[C]. IEEE Int. Wireless Communication System Symposium, NY USA, 1995: 225–230.
- [12] Wesolowski K and Pochmara J. Efficient algorithm for adjustment of adaptive predistorter in OFDM transmitter[C]. IEEE VTS-Fall VTC’2000, Tokyo Japan, 2000, vol.5: 2491–2496.
- [13] Ai B, Yang Z X, Pan C Y, Zhang T T, and Ge J H. Effects of PAPR reduction on HPA predistortion[J]. *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, 2005, 51(4): 1143–1147.
- 艾 渤: 男, 1974年生, 博士后, 研究兴趣包括 OFDM 系统同步、HPA 线性化技术。
- 杨知行: 男, 1946年生, 清华大学数字电视传输技术研发中心主任, 教授, 博士生导师, 研究领域包括卫星通信、DTV 系统。
- 潘长勇: 男, 1975年生, 副教授, 主要从事数字电视地面广播相关领域的科研工作。
- 张涛涛: 男, 1982年生, 硕士生, 从事 HPA 线性化技术研究。
- 阳 辉: 男, 1967年生, 副研究员, 主要从事 HDTV、射频系统算法分析及硬件设计。