

一种基于分段线性化的低邻道泄漏预失真方法

胡 明, 潘文生, 朱晓东

(电子科技大学通信与信息工程学院, 四川成都 611731)

摘 要: 本文基于预失真技术提出一种记忆非线性系统的线性化处理办法. 与传统预失真模型(直接学习型、间接学习型)获取系统逆传递函数的方式不同, 这里采用直接获取记忆非线性系统传递函数的方式, 将传递函数表示为分段线性化形式后, 应用于所提出的预失真方法中. 验证结果显示, 该方法与无预失真情况相比, 记忆非线性系统输出的归一化均方误差改善约 80dB, 且邻道泄漏比的改善值超过 70dB, 克服系统的记忆性、非线性, 让记忆非线性系统的输出和输入呈现线性关系.

关键词: 预失真; 分段线性化; 邻道泄漏比; 记忆非线性系统

中图分类号: TN830.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 11-2297-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.11.029

A New Predistortion Method with Low Adjacent Channel Leakage Based on Piecewise Linear

HU Ming, PAN Wen-sheng, ZHU Xiao-dong

(School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: A new method of linearity based on predistortion for memory nonlinear system is introduced in this paper. Different from the traditional predistortion models (direct study model and indirect study model), the transfer function instead of the inverse transfer function is obtained for memory nonlinear system. The transfer function is presented as piecewise linear function first, and then be used in predistortion process. The results show that the NMSE (Normalized Mean Square Error) of the memory nonlinear system output is reduced about 80dB, and the ACLR (Adjacent Channel Leakage Ratio) is reduced over 70dB, comparing with no predistortion system. The memory and nonlinear characteristics are eliminated, and the relationship of input and output becomes linear and memoryless.

Key words: predistortion; piecewise linear; adjacent channel leakage ratio; memory nonlinear system

1 引言

在无线通信系统中, 为了提高功率放大器的效率, 一般让其工作在非线性区域, 同时, 功放中的储能元件使其输出不仅与当前输入相关, 而且与过去时刻的输入有关, 因此, 功放具有记忆性和非线性特征, 这使功放输出含有较多带外杂散信号, 干扰邻近信道的接收. 所以, 如何降低功放输出信号的邻道泄漏比 (ACLR: Adjacent Channel Leakage Ratio) 一直是人们关注的焦点.

目前, 线性化处理的一种主要手段是预失真技术, 通过对输入信号进行预处理, 使输入与记忆非线性系统的输出呈现线性关系. 常见的预失真模型有直接学习型 and 间接学习型, 其中所采用的记忆非线性系统模型有 **Wiener 模型**^[1~3]、**Hammerstein 模型**^[2~5]、记忆多项式模

型^[2,6~8]、Volterra 级数模型^[4,9]等, 为了描述非线性特征, 部分研究采用分段线性化^[1,10,11] (PWL: Piece Wise Linear) 思想. 这些模型一般通过求功放逆传递函数的方式 (LS 算法^[3]、LMS 算法^[12]、RLS 算法^[13] 等是较常见的参数获取方法), 对输入信号进行预处理, 但效果不够理想, 其中, 较好的归一化均方误差约 -50dB^[4,6], 较高的 ACLR 改善值在 30dB 至 36dB 之间^[2,6~8], 这仍有可能干扰其它近距离天线在相邻信道上的接收与发射.

为进一步提高 ACLR 改善值, 本文未采用求功放逆传递函数的方式, 而是通过直接获取功放输入输出非线性关系曲线, 并利用分段线性化方法进行拟合的方式, 获取功放的传递参数, 预失真模块利用该分段线性化传递参数对输出值进行预测, 并按照线性化要求对输入做

收稿日期: 2012-06-15; 修回日期: 2013-07-09; 责任编辑: 马兰英

基金项目: 国家重大专项 (No. 2010ZX03007-003, No. 2011ZX03001-006-01, No. 2012ZX03003010-003, No. 2014ZX03003001-002); 国家自然科学基金 (No. 61101034, No. 61271164, No. 61001087, No. u1035002/L05)

预处理. 因为避免了较复杂的传递函数求逆过程, 而且 PWL 可通过缩小分段间距来减小拟合误差, 所以使该方案 ACLR 改善值超过 70dB, 较好地克服了记忆性、非线性, 系统的线性化程度大幅提高.

2 系统模型

2.1 一种新的预失真系统模型

本文采用的预失真系统模型如图 1 所示. 记忆非线性模块为需要进行线性化处理的对象; 测试序列生成模块将标准测试数据发送至记忆非线性模块、信号检测与分析模块; 信号检测与分析模块用于确定记忆深度(即: 当前时刻输出值与过去哪几个时刻输入信号相关), 并计算各相关时刻的分段线性化传递参数; 预失真模块应用分段线性化传递参数, 对输入信号的输出值进行预测, 并依据线性化要求对信号进行调整, 使记忆非线性模块的输出信号与预失真模块的输入信号之间呈现线性关系.

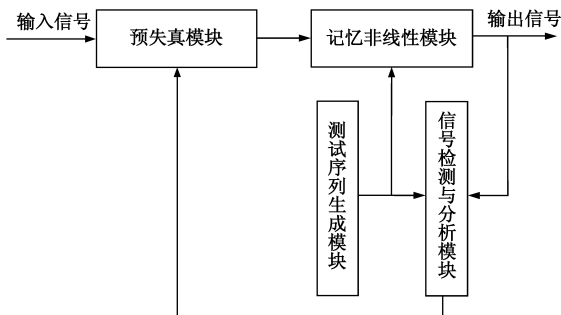


图1 预失真系统模型

2.2 PWL 在预失真系统中的应用

上述预失真系统的核心是确定记忆非线性模块的传递参数, 这里首先采用分段线性化方法, 给出非线性系统的输入输出数学关系式, 然后将其应用于记忆非线性系统, 给出记忆非线性系统的输入输出关系式. 采用分段线性化方法的一个优势在于, 其估计误差会随着分段间隔的进一步缩短而减小.

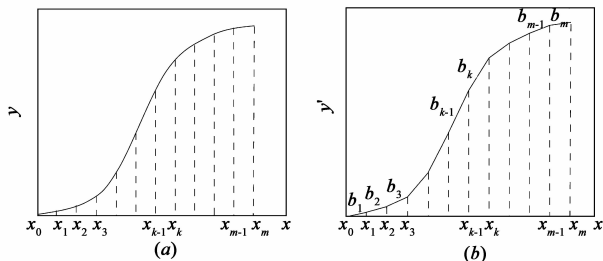


图2 非线性曲线的分段线性化

如图 2 所示, 图 2(a) 是一非线性系统的输入输出曲线, 图 2(b) 是它的一种分段线性化方式. 显然, 两者的误差会随着分段间距的进一步缩短而减小, 当间距

趋近于零时, 可将图 2(b) 近似等同于图 2(a). 假设曲线被分为 m 段, 那么该曲线可以用 m 段折线近似表示, 这 m 段折线共有 $m+1$ 个端点, 各端点的横坐标分别用 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_m$ 表示. 那么第 k 段折线可表示为:

$$f_k(x) = a_k + b_k x, \quad x_{k-1} < x \leq x_k \quad (1)$$

整个折线可表示为:

$$f(x) = f_1(x) + f_2(x) + f_3(x) + \dots + f_m(x), \quad x_0 < x \leq x_m \quad (2)$$

将式(1)的定义区间延伸为整个曲线的定义区间, 则变为函数:

$$F_k(x) = \begin{cases} 0, & x_0 < x \leq x_{k-1} \\ a_k + b_k x, & x_{k-1} < x \leq x_m \end{cases} \quad (3)$$

这样, 每一段折线均可采用式(3)方式, 在区间 (x_0, x_m) 内表示为二段折线, $f_k(x)$ 和 $F_k(x)$ 在区间 (x_{k-1}, x_k) 内相等. 下面推导分段线性函数的数学表达式.

Step1 令第 1 段折线及其延伸线表示为:

$$g_1(x) = a_1 + b_1 x, \quad x_0 < x \leq x_m \quad (4)$$

将式(4)写成二段折线的形式:

$$G_1(x) = \begin{cases} 0, & x \leq x_0 \\ a_1 + b_1 x, & x_0 < x \leq x_m \end{cases} \quad (5)$$

显然, $g_1(x)$ 和 $G_1(x)$ 在区间 (x_0, x_m) 内相等.

Step2 将第 2 段折线写成二段折线的形式:

$$G_2(x) = \begin{cases} 0, & x \leq x_1 \\ a_2 + b_2 x, & x_1 < x \leq x_m \end{cases} \quad (6)$$

令: $\Delta G_2(x) = G_2(x) - G_1(x), \quad x_1 < x \leq x_m$ (7)

将式(5)、(6)代入式(7), 可得:

$$\Delta G_2(x) = \frac{1}{2} \delta_1 \{ |x - x_1| + (x - x_1) \} \quad (8)$$

其中, $\delta_1 = b_2 - b_1$. 那么, 第 1 段折线加上第 2 段折线及其延伸线可表示为:

$$g_2(x) = g_1(x) + \Delta G_2(x), \quad x_0 < x \leq x_m \quad (9)$$

Step3 将第 3 段折线写成二段折线的形式:

$$G_3(x) = \begin{cases} 0, & x \leq x_2 \\ a_3 + b_3 x, & x_2 < x \leq x_m \end{cases} \quad (10)$$

同理, 有: $\Delta G_3(x) = \frac{1}{2} \delta_2 \{ |x - x_2| + (x - x_2) \}$ (11)

其中, $\delta_2 = b_3 - b_2$. 那么, 第 1 段折线、第 2 段折线、加上第 3 段折线及其延伸线可表示为:

$$g_3(x) = g_2(x) + \Delta G_3(x), \quad x_0 < x \leq x_m \quad (12)$$

以此类推, 有:

$$\Delta G_m(x) = \frac{1}{2} \delta_{m-1} \{ |x - x_{m-1}| + (x - x_{m-1}) \} \quad (13)$$

$$g_m(x) = g_{m-1}(x) + \Delta G_m(x), \quad x_0 < x \leq x_m \quad (14)$$

其中, $\delta_{m-1} = b_m - b_{m-1}$, 且 $g_m(x)$ 即为各分段折线的总和 $f(x)$, 将 $\Delta G_i(x)$ ($i = 2, 3, 4, \dots, m$) 依次代入式

(14),有:

$$f(x) = g_m(x) = a_1 + b_1x + \sum_{i=2}^m \Delta G_i(x)$$

$$= a_1 + b_1x + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m-1} \delta_i \{ |x - x_i| + (x - x_i) \},$$

$$x_0 < x \leq x_m \quad (15)$$

上式即为非线性系统输入输出关系的分段函数表示.假设在记忆非线性系统中,各记忆时刻对输出的影响相互独立(在 Wiener、Hammerstein、记忆多项式等模型的数学表达式中均可看到这一点.),那么记忆非线性系统的输出可表示为:

$$f(x_n, x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_{n-j}) = f(x_n) + f(x_{n-1}) + f(x_{n-2}) + \dots + f(x_{n-j}) \quad (16)$$

其中, x_n 表示当前时刻输入, x_{n-1} 表示过去 1 时刻输入, x_{n-2} 表示过去 2 时刻输入, x_{n-j} 表示过去 j 时刻输入.将式(15)代入式(16),并用 m_{n-j} ($j=0, 1, 2, \dots$) 表示各时刻的分段数,得:

$$f(x_n, x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_{n-j})$$

$$= a_{1,n} + b_{1,n}x_n + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m_{n-1}} \delta_{i,n} \{ |x_n - x_{i,n}| + (x_n - x_{i,n}) \}$$

$$+ a_{1,n-1} + b_{1,n-1}x_{n-1} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m_{n-1}-1} \delta_{i,n-1} \{ |x_{n-1} - x_{i,n-1}| + (x_{n-1} - x_{i,n-1}) \}$$

$$+ a_{1,n-2} + b_{1,n-2}x_{n-2} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m_{n-2}-1} \delta_{i,n-2} \{ |x_{n-2} - x_{i,n-2}| + (x_{n-2} - x_{i,n-2}) \}$$

$$+ \dots + a_{1,n-j} + b_{1,n-j}x_{n-j} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m_{n-j}-1} \delta_{i,n-j} \{ |x_{n-j} - x_{i,n-j}| + (x_{n-j} - x_{i,n-j}) \} \quad (17)$$

3 分段线性化预失真方法

在基于图 1 进行预失真处理时,获取各时刻输入与当前输出之间的关系参数是方案的关键,整个预失真处理方法的流程如图 3 所示.

在进行预失真处理时,信号检测与分析模块需首先确定记忆非线性模块输出与过去哪几个时刻的输入相关(即:确定记忆深度 j),然后再分别获取各记忆时刻输入与输出之间的非线性关系曲线,并采用分段线性化方式计算 $a_{1,n-j}$ 、 $b_{1,n-j}$ 、 $\delta_{i,n-j}$ 等参数,最后将这些参数传递给预失真模块.预失真模块首先利用这些参数,运用式(17)计算不同输入情况下的输出预测值,然后按照线性化要求对当前时刻输入 x_n 进行预调整,使记忆非线性模块的输出与预失真模块的输入之间呈现线性关系.当出现环境温度变化、器件老化等情况,使记忆非线性模块输出的邻道泄漏比超出预期值,将重新确定非线性参数.

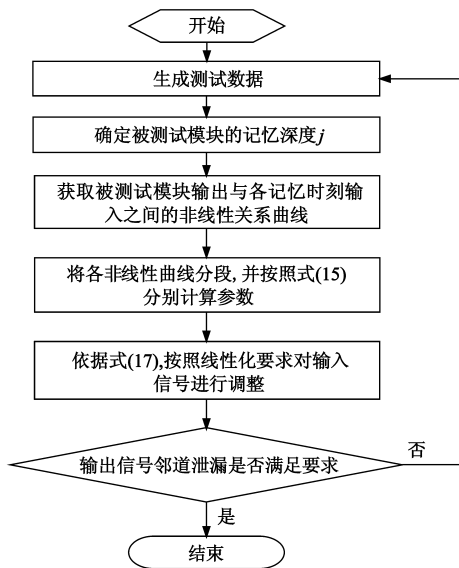


图3 预失真流程

4 验证结果

这里采用理论结果和计算机仿真相结合的方式验证前述模型及方法.建立如图 1 所示的仿真模型,其中,记忆非线性模块(功率放大器)采用记忆深度为 2、非线性阶次为 5 的记忆多项式模型,其关系表达式及参数如式(18)、(19)所示^[2,7,8],输入信号范围不大于 1dB 压缩点.

$$y(n) = \sum_{k=1}^5 \sum_{\substack{q=0 \\ k \text{ odd}}}^2 c_{kq} x(n-q) |x(n-q)|^{k-1} \quad (18)$$

$$c_{10} = 1.0513 + 0.0904j, c_{30} = -0.0542 - 0.2900j,$$

$$c_{50} = -0.9657 - 0.7028j$$

$$c_{11} = -0.0680 - 0.0023j, c_{31} = 0.2234 + 0.2317j,$$

$$c_{51} = -0.2451 - 0.3735j$$

$$c_{12} = 0.0289 - 0.0054j, c_{32} = -0.0621 - 0.0932j,$$

$$c_{52} = 0.1229 + 0.1508j \quad (19)$$

在进行验证时,通过测试序列生成模块给放大器发送一组标准数据序列,信号检测与分析模块对放大器的输入输出进行对比分析,确定其记忆深度以及不同时刻的非线性关系,计算 PWL 模型参数(为了便于计算,在对各时刻的非线性曲线进行分段时,采用相同间距 d).预失真模块利用这组参数对放大器输出做预估,并按照线性化原则对输入进行预处理,使预失真模块的输入与放大器的输出之间呈现线性关系.

为了验证 PWL 理论模型与功放的一致性,需考查由式(17)计算的理论与上述功放模型输出的误差.图 4、图 5 是在任意选取 10ms 时间段内,记忆多项式功放模型输出与相应理论计算结果之间的绝对误差分布

图,横坐标表示时间,纵坐标表示误差绝对值,图中各点代表不同的误差值.其中,图4是PWL模型分段间距为 d (取值0.0024,下同)的情况,图5是PWL模型分段间距为 $d/4$ (取值0.0006,下同)的情况.可以看出,误差

值越大,点的分布越稀疏,说明PWL模型的理论值较好地拟合了记忆非线性系统的输出,而且当分段间距由 d 进一步缩小到 $d/4$ 后,其误差范围由小于 3.5×10^{-6} 缩小到小于 2×10^{-7} ,精确度大幅提高.

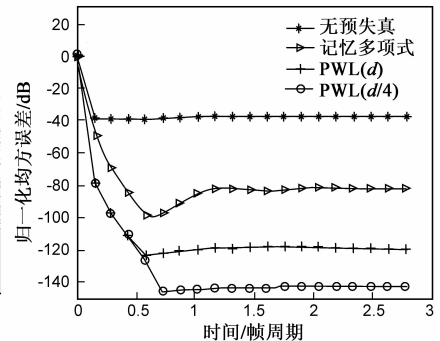
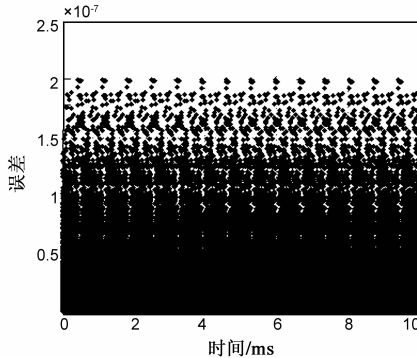
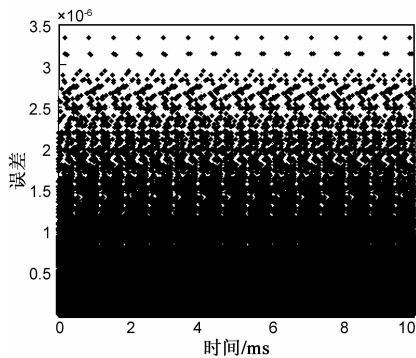


图4 分段间距为 d (0.0024)时的误差分布图 图5 分段间距为 $d/4$ (0.0006)时的误差分布图

图6 归一化均方误差(NMSE)对比

图6、图7分别显示了输出信号的NMSE(归一化均方误差)及线性化改善情况.图6显示在不同情况下,功率放大器输出与理想输出(线性无记忆)之间的NMSE,从中可以看出,功放直接输出(无预失真)的误差最大,其次是“记忆多项式”预失真方案,其NMSE改善约40dB,本文提出的方法可将NMSE改善值提高到80dB(分段间距为 d)或100dB(分段间距为 $d/4$).图7是输入信号与各关键点信号幅度关系对比图,其中,“a”是未经预失真处理的放大器直接输出,它是一条带状曲线,显示出记忆非线性特征,“b”是预失真模块输出,显示预失真模块对输入的预处理情况,“c”是经过预失真处理后的放大器输出,它是一条细直线,说明该模型已将放大器的记忆非线性特性转化为无记忆线性特性.

图8、图9显示了本方法对带外杂散信号的抑制作用.在图8中,“1”是原始输入信号,“2”是未经预失真处理的放大器输出,“3”是经预失真处理后的放大器输出,“4”是“记忆多项式”预失真方案的效果.不难看出,本方法对功放产生的带外信号有较强抑制作用,其输出频谱与原始输入信号差距较小,放大器输出的ACLR改善值超过70dB.此外,图8的“3”与“1”在底部并未完全重合,这是由PWL模型分段折线与原始曲线之间的误差造成,这种误差会随着分段间距 d 的缩短而减小.图9显示了分段间距缩小为 $d/4$ 后的效果,“3”与“1”的拟合程度进一步提高,与图8相比,ACLR改善值进一步提高约20dB.

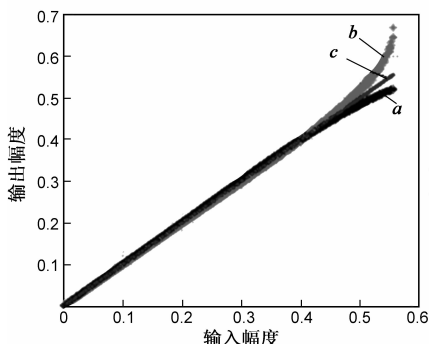


图7 幅度关系对比

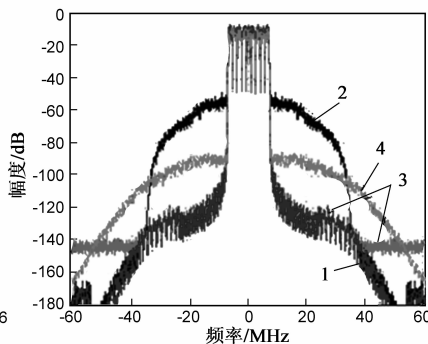


图8 频域关系对比

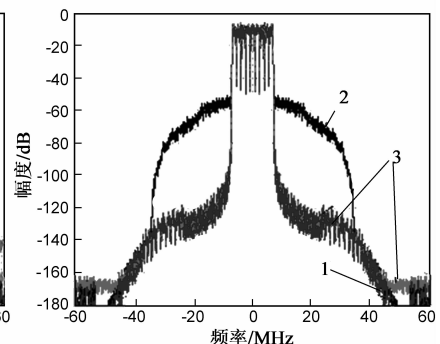


图9 分段间距为 $d/4$ 时的频域关系对比

5 总结

如何让记忆非线性系统的输出与输入之间呈现线性关系,消除记忆性、非线性,这一直是广为关注的焦点.本文所提出的预失真方法未采用求记忆非线性系统逆传递函数的方式,而是直接获取其传递函数,在各记忆时刻对输出的影响相互独立的条件下,给出记忆

非线性系统的输入输出分段线性化数学关系式,并将其应用于所提出的预失真方法中.验证结果显示,该方法对记忆非线性系统输出值的理论估计具有较高精度,从而使归一化均方误差(NMSE)改善值优于80dB,邻道泄漏比(ACLR)改善值大于70dB,优于其它方案,而且通过缩小分段间距,可以获得更大改善效果,进一步提高输出与输入之间的线性化程度.

在前述仿真中,采取等间隔的分段方式,其优点是分段方法简单、便于操作.但对于形态变化较大的非线性曲线,这会使各分段折线与对应曲线段的近似程度变化较大,降低预测精度.为此,下一步工作将考虑采用自适应调整分段间距的方式,使各段折线与对应曲线段的近似度变化较小,这有利于在获得相同线性化程度的情况下减少分段数量,缩短运算时间,满足高速数字信号处理要求.另一方面,自适应分段方法本身又会带来一定的额外运算量,如何选择一种较好的自适应分段方式有待进一步研究.

参考文献

- [1] J E Cousseau, J L Figueroa, S Werner et al. Efficient nonlinear wiener model identification using a complex-valued simplicial canonical piecewise linear filter[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(5): 1780 – 1792.
- [2] L Ding, G T Zhou, D R Morgan et al. A robust digital baseband predistorter constructed using memory polynomials[J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(1): 159 – 165.
- [3] J Goodman, M Herman, B Bond et al. A log-frequency approach to the identification of the wiener-hammerstein model [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(10): 889 – 892.
- [4] J Moon and B Kim. Enhanced hammerstein behavioral model for broadband wireless transmitters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(4): 924 – 933.
- [5] Y J Xu, et al. Dynamic extended hammerstein model of RF power amplifiers for digital predistortion [A]. In Proc. IEEE EuMIC' 2011[C]. Manchester, UK, 2011. 276 – 279.
- [6] B Ai, et al. Novel pre-distortion of power amplifier with proposed fractional order memory polynomial [A]. In Proc. IEEE GLOBECOM' 2011[C]. Houston, TX, USA, 2011.
- [7] 张钦, 吴嗣亮, 李海. 一种新的用于有记忆功放的查表预失真器[J]. 电子学报, 2008, 36(9): 1728 – 1732.
ZHANG Qin, WU Si-liang, LI Hai. A new look-up-table predistorter for power amplifier with memory effects [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(9): 1728 – 1732. (in Chinese)
- [8] W S Pan, et al. A predistortion algorithm based on accurately solving the reverse function of memory polynomial model[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2012, 1(4): 384 – 387.
- [9] A Zhu, P J Draxler, J J Yan et al. Open-loop digital predistorter for RF power amplifiers using dynamic deviation reduction-based volterra series[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(7): 1524 – 1534.
- [10] S M Kang and L O Chua. A global representation of multidimensional piecewise-linear functions with linear partitions[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1978, cas-25(11): 938 – 940.
- [11] L O Chua and S M Kang. Section-wise piecewise-linear functions: canonical representation, properties, and applications[J]. Proceedings of the IEEE, 1977, 65(6): 915 – 929.
- [12] 高鹰, 谢胜利. 一种变步长 LMS 自适应滤波算法及分析 [J]. 电子学报, 2001, 29(8): 1094 – 1097.
GAO Ying, XIE Sheng-li. A variable step size LMS adaptive filtering algorithm and its analysis [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(8): 1094 – 1097. (in Chinese)
- [13] 熊鹰, 梁树雄, 尹俊勋. 混合噪声中非线性 RLS 算法的性能分析 [J]. 电子学报, 2001, 29(7): 981 – 983.
XIONG Ying, LEUNG Shu-hung, YIN Jun-xun. Performance analysis of nonlinear RLS in mixture noise [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(7): 981 – 983. (in Chinese)

作者简介

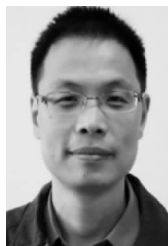


胡 明 (通信作者) 男, 博士, 副教授, 1965 年 7 月出生. 1988 年、1998 年分别在重庆邮电学院、电子科技大学获工学学士、工学博士学位. 其后在华为技术有限公司等从事产品开发和技術管理工作, 2003 年进入电子科技大学通信与信息工程学院, 主要从事宽带通信网关键技术研究.

E-mail: huming@uestc.edu.cn



潘文生 男, 博士研究生, 1975 年 11 月出生. 分别于 1998 年、2005 年在电子科技大学获工学学士、硕士学位. 现就读于电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 研究方向为高效宽带功率放大器、峰均比抑制、数字预失真技术.



朱晓东 男, 博士, 副教授, IEEE 会员, 1976 年 5 月出生. 1997 年、2004 年和 2009 年分别在西安电子科技大学、华中科技大学获得工学学士、硕士、博士学位. 现就职于电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 主要从事宽带无线通信关键技术研究.