

基于记忆有理函数的功率放大器行为模型*

王 晖, 菅春晓, 李高升, 刘培国

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对功率放大器的非线性特性及记忆效应,提出了一种基于记忆有理函数的功放行为模型。在传统记忆多项式模型和无记忆有理函数模型基础上,构建记忆有理函数模型,并利用共轭梯度法辨识模型系数,同时比较不同记忆深度和不同非线性阶数下的归一化均方误差,获取最佳记忆深度和非线性阶数。采用多载波的 WCDMA 信号和 MRF6S21140H 功放来验证模型的有效性,并与记忆多项式模型、无记忆有理函数模型进行了比较。结果表明,记忆有理函数模型在减少系数数目的同时具有更好的逼近精度。

关键词:功率放大器;记忆有理函数;行为模型;非线性特性;记忆多项式

中图分类号:TN72 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)03-0149-04

Power amplifier behavioral modeling using memory rational function

WANG Hui, JIAN Chunxiao, LI Gaosheng, LIU Peiguo

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming at the nonlinear characteristics and memory effects of power amplifier, a memory rational function behavioral model, which is based on the memory polynomial model and memoryless rational function model, is proposed. The model coefficients were identified by conjugate gradient method. The estimation of the best model nonlinearity order and the best memory depth was carried out with the minimized the normalized mean squared error (NMSE). The model was validated using multi-carrier WCDMA signal and a MRF6S21140H power amplifier by measurement. The result indicates that the proposed model can achieve better model performance with less number of coefficients, compared with the memory polynomial model and memoryless rational function model.

Key words: power amplifier; memory rational function; behavioral model; nonlinear characteristics; memory polynomial

功率放大器是射频发射机中的关键器件,由于其本身是非线性器件,并且经常工作在饱和区,因此表现出较强的非线性特性。功放的非线性特性主要表现在随着输入信号幅度的增大,功放达到饱和状态,输出信号的频谱展宽,产生带外辐射,对相邻信道产生干扰,降低信号质量,增加误码率。

近年来,功放的建模及线性化技术引起了国内外众多研究者以及研究机构的浓厚兴趣。Pedro^[1]与 Isaksson^[2]对常见的功放的模型进行了综述,并将功放的模型分为无记忆模型和记忆模型。典型的无记忆模型有 Saleh 模型^[3]和 Rapp 模型^[4], Saleh 模型主要用于描述行波管放大器 (Traveling Wave Tube Amplifier, TWTA) 的非线性特性, Rapp 模型用于描述固态功率放大器 (Solid State Power Amplifier, SSPA) 的非线性特性。在窄带通信系统中,无记忆模型足以描述功放的非线性特性,但在宽带通信系统中,功放的记忆效应

十分明显,因此必须考虑功放记忆效应。常见的记忆模型有记忆多项式模型 (Memory polynomial, MP)^[5]、Hammerstein 模型^[5]、Weiner 模型^[5]、Volterra 模型^[6],以及这些模型的混合模型^[1-2]等。

有理函数模型在功率放大器的预失真中得到应用^[7-10],但都是无记忆的,在描述功放的记忆效应上存在一定缺陷。因此,本文通过分析 MP 模型数值稳定性以及无记忆有理函数 (Memoryless Rational Function, MLRF) 模型的数值精度,提出了一种基于记忆有理函数 (Memory Rational Function, MRF) 的功放行为模型。利用共轭梯度法辨识模型系数,克服了最小二乘法在矩阵求逆时带来的数值不稳定性问题;在 MLRF 模型上添加延时项,提高了数值精度。通过比较不同记忆深度和不同非线性阶数下的归一化均方误差 (Normalized Mean Square Error, NMSE),获取最佳记忆深度和非线性阶数。采用多载波的

* 收稿日期:2012-09-11

基金项目:国家部委资助项目

作者简介:王晖(1983—),男,安徽歙县人,博士研究生,E-mail:wanghui@nudt.edu.cn;

刘培国(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:pg731@126.com

WCDMA 信号进行验证,用 NMSE 衡量模型的精度,测试结果分别与 MP 模型、MLRF 模型相比较,MRF 模型在减少系数数目的同时具有更好的逼近精度。

1 传统的记忆多项式模型

对于存在非线性特性和记忆效应的功放,其输入输出关系可以用一个离散形式的非线性函数表示:

$$y(n) = f(x(n), x(n-1), \dots, x(n-Q)) \quad (1)$$

其中, Q 为放大器的记忆深度, $f(\cdot)$ 为非线性传输函数, $x(n)$ 为输入基带信号, $y(n)$ 为输出基带信号。式(1)可写成记忆多项式^[1,5]的形式,其结构如图 1 所示。

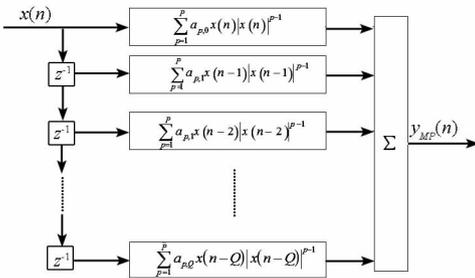


图 1 多项式模型框图

Fig. 1 Block diagram of memory polynomial model

$$y_{MP}(n) = \sum_{p=1}^P \sum_{q=0}^Q a_{pq} x(n-q) |x(n-q)|^{p-1} \quad (2)$$

其中, P 为放大器的非线性阶数, a_{pq} 为 MP 模型系数。

令

$$u_{pq}(n) = x(n-q) |x(n-q)|^{p-1} \quad (3)$$

$$\mathbf{y}_{MP} = [y(0), y(1), \dots, y(N-1)]^T$$

$$\mathbf{U}_{MP} = [u_{10}, \dots, u_{p0}, \dots, u_{1Q}, \dots, u_{pQ}] \quad (4)$$

$$\mathbf{u}_{pq} = [u_{pq}(0), u_{pq}(1), \dots, u_{pq}(N-1)]^T$$

$$\mathbf{a} = [a_{10}, \dots, a_{p0}, \dots, a_{1Q}, \dots, a_{pQ}]^T$$

则式(2)可表示为

$$\mathbf{y}_{MP} = \mathbf{U}_{MP} \mathbf{a} \quad (5)$$

行为模型的参数辨识就是根据测量的输入输出数据求取系数的过程,可以利用最小二乘法求解式(5),得 \mathbf{a} 的最小二乘解:

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{U}_{MP}^H \mathbf{U}_{MP})^{-1} \mathbf{U}_{MP}^H \mathbf{y}_{MP} \quad (6)$$

其中 $(\cdot)^H$ 为矩阵的共轭转置。

在 MP 模型的基础上,文献[1,11]提出了一种包络记忆多项式模型(Envelope Memory Polynomial, EMP),两者的区别在于,EMP 模型是信号幅度的函数,而 MP 模型是信号复包络的函数,其表达式为

$$y_{EMP}(n) = x(n) \sum_{p=1}^P \sum_{q=0}^Q b_{pq} |x(n-q)|^{p-1} \quad (7)$$

其中 b_{pq} 为 EMP 模型系数。

对于 MP 模型,式(5)中矩阵 \mathbf{U}_{MP} 的条件数往往很大,因此方程是病态的。图 2 描述了矩阵 \mathbf{U}_{MP} 的条件数随非线性阶数和记忆深度变化的曲面,从图中可以看出,随着非线性阶数和记忆深度的增加,矩阵 \mathbf{U}_{MP} 的条件数呈指数增长,这给式(6)的求解带来了极大不稳定性。EMP 模型的求解过程中也存在同样的问题,这里不展开讨论。

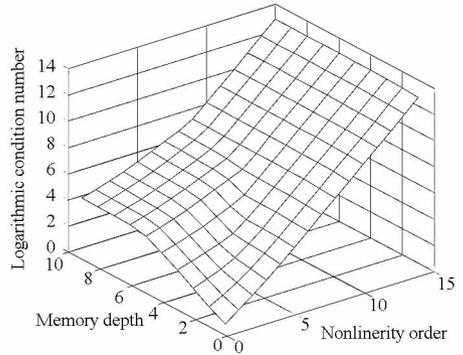


图 2 矩阵 \mathbf{U}_{MP} 的条件数

Fig. 2 Condition numbers of matrix \mathbf{U}_{MP}

2 有理函数模型

2.1 无记忆有理函数模型

有理函数模型可以写成两个多项式的商^[1,9],如式(8)所示,文献[1,9]建立的模型属于本文的 MLRF 模型:

$$y_{MLRF}(n) = \frac{a_0 + a_1 x(n) + a_2 x^2(n) + \dots + a_{P_N} x^{P_N}(n)}{b_0 + b_1 x(n) + b_2 x^2(n) + \dots + b_{P_D} x^{P_D}(n)} \quad (8)$$

其中 a_i, b_i 分别为分子多项式和分母多项式的系数, P_N, P_D 分别为分子多项式和分母多项式的非线性阶数。对于多项式系数 a_i, b_i 的辨识同样可以采取最小二乘法计算得到。由于 MLRF 模型未考虑功放的记忆效应,因此 MLRF 模型估计功放输出信号时有比较大的误差。

2.2 记忆有理函数模型

在 MLRF 模型基础上添加延时项,即将 MP 模型与 EMP 模型结合写成有理函数形式,可以得到 MRF 模型,其表达式如下:

$$y_{MRF}(n) = \frac{\sum_{p=1}^{P_N} \sum_{q=0}^{Q_N} a_{pq} x(n-q) |x(n-q)|^{p-1}}{1 + \sum_{p=1}^{P_D} \sum_{q=0}^{Q_D} b_{pq} x(n-q) |x(n-q)|^{p-1}} \quad (9)$$

其中 a_{pq} 、 b_{pq} 分别为分子多项式和分母多项式的系数, P_N 、 P_D 分别为分子多项式和分母多项式的非线性阶数, Q_N 、 Q_D 分别为分子多项式和分母多项式的记忆深度。

令

$$u_{pq}(n) = x(n) |x(n-q)|^{p-1} \quad (10)$$

$$v_{pq}(n) = x(n-q) |x(n-q)|^{p-1} y(n)$$

$$\mathbf{y}_{MRF} = [y(0), y(1), \dots, y(N-1)]^T$$

$$\mathbf{u}_{pq} = [u_{pq}(0), u_{pq}(1), \dots, u_{pq}(N-1)]^T$$

$$\mathbf{v}_{pq} = [v_{pq}(0), v_{pq}(1), \dots, v_{pq}(N-1)]^T$$

$$\mathbf{U}_{MRF} = [u_{10}, \dots, u_{p_N0}, \dots, u_{1Q_N}, \dots, u_{p_NQ_N}, \\ -v_{10}, \dots, -v_{p_D0}, \dots, -v_{1Q_D}, \dots, -v_{p_DQ_D}]$$

$$\boldsymbol{\theta} = [a_{10}, \dots, a_{p_N0}, \dots, a_{1Q_N}, b_{10}, \dots, b_{p_D0}, \dots, \\ b_{1Q_D}, \dots, b_{p_DQ_D}]^T \quad (11)$$

则式(9)可表示为

$$\mathbf{y}_{MRF} = \mathbf{U}_{MRF} \boldsymbol{\theta} \quad (12)$$

由于 MRF 模型的矩阵 \mathbf{U}_{MRF} 的条件数并没有得到改善, 本文引入共轭梯度法^[1,12] 求解方程(12), 避免矩阵 \mathbf{U}_{MRF} 条件数过大引起的数值不稳定性。假设 $\boldsymbol{\theta}_0$ 为初始估计向量, 初始估计误差 $\mathbf{r}_0 = \mathbf{y}_{MRF} - \mathbf{U}_{MRF} \boldsymbol{\theta}_0$, 令 $\mathbf{p}_0 = \boldsymbol{\theta}_0$, 对于每个 $k \in N$, 按式(13)进行迭代, 同时给定阈值 ε , 本文取 $\varepsilon = 1e-16$, 当 $r_k < \varepsilon$, 结束迭代过程。

$$\alpha_k = \frac{\mathbf{r}_k^T \mathbf{r}_k}{\mathbf{p}_k^T \mathbf{U}_{MRF} \mathbf{p}_k}$$

$$\boldsymbol{\theta}_{k+1} = \boldsymbol{\theta}_k + \alpha_k \mathbf{p}_k$$

$$\mathbf{r}_{k+1} = \mathbf{r}_k - \alpha_k \mathbf{U}_{MRF} \mathbf{p}_k \quad (13)$$

$$\beta_{k+1} = \frac{\mathbf{r}_{k+1}^T \mathbf{r}_{k+1}}{\mathbf{r}_k^T \mathbf{r}_k}$$

$$\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{r}_{k+1} + \beta_{k+1} \mathbf{p}_k$$

$$k = k + 1$$

2.3 模型维数估计

模型误差采用 NMSE 来衡量^[1,13], 其定义由式(14)给出, 其中 N 是采样点的个数, $y_{meas}(n)$ 为测量所得的时域信号, $y_{est}(n)$ 为模型估计输出的时域信号。

$$NMSE_{dB} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{n=1}^N |y_{meas}(n) - y_{est}(n)|^2}{\sum_{n=1}^K |y_{meas}(n)|^2} \right) \quad (14)$$

对于 MP 模型, 通过训练数据计算并比较不

同记忆深度和非线性阶数下的 NMSE (非线性阶数以步进 1 从 0 到 15 进行扫描, 记忆深度以步进 1 从 0 到 10 进行扫描), 从而获取 MP 模型最佳记忆深度和非线性阶数(定义为模型维数), 当 $P = 8, Q = 5$ 时, NMSE 最小, 此时对于 MP 模型来说精度最高。对于 MRF 模型, 采用同样的方法估计模型维数, 比较 (P_N, Q_N, P_D, Q_D) 不同组合下的 NMSE, 在 $(P_N, Q_N, P_D, Q_D) = (2, 8, 3, 5)$ 时, NMSE 最小, 获取最佳模型维数。

3 仿真实验

本文利用 Agilent 公司提供的 ADS-VSG-VSA 解决方案^[1,14], 提取功放输入和输出信号的复包络数据, 并将所获取的数据用于所提出的行为模型的参数提取和验证。整个系统测试平台如图 3 所示, 从图中可以看出, 整个测试平台由主机、PSG 矢量信号发生器 (E8267D) 和 PXA 信号分析仪 (N9030A) 所组成, 主机中包含 ADS 系统仿真软件和 MATLAB 数值计算软件, 仪器和计算机通过 LAN 连接到集线器 (Hub)。为了实现发射和接收信号的同步, 将 E8267D 的 10MHz 参考时钟连接到 N9030A, 并将 E8267D 的 Event 接口产生触发信号, 作为 N9030A 的触发信号。使用 ADS 软件生成功率放大器的激励信号, 通过 LAN 下载至 E8267D, 首先在直通情况下, 信号直接输入 N9030A, 利用 N9030A 采样信号, 作为功放的输入信号, 然后将 E8267D 生成的信号注入功放, 功放的输出信号通过衰减器后, 利用 N9030A 采集, 作为功放的输出信号, 最后利用 MATLAB 进行信号处理。

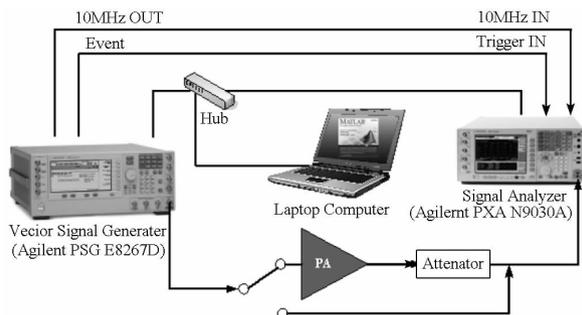


图 3 测试配置图

Fig. 3 Test setup block diagram

验证实验采用 Freescale 公司的 MRF6S21140H 功放作为测试对象, 其工作频率为 2110 ~ 2170MHz, 测试信号为 1001 配置的 WCDMA 信号 (WCDMA1001), 其中载波带宽为 5MHz, 中心频率为 2.14GHz。数据采集过程中, N9030A 的采样率设置为 92.16MHz, 采样时间设置为 2ms, 采样

获得 184320 个数据点,取其中 8192 个数据点作为训练数据,对上述 MP 模型、MLRF 模型、MRF 模型进行参数辨识,最后再选取 8192 个数据点作为验证数据,对模型性能进行评估。

图 4 给出了 WCDMA1001 信号测试与模型输出频谱的比较,从图 4 可以看出,在带内,MRF 模型的频谱与功放的实测输出频谱几乎重叠,在带外,MRF 模型的频谱也能较好地逼近实测功放的输出频谱。表 1 给出了针对 WCDMA1001 信号的 MP 模型、MLRF 模型、MRF 模型的模型维数、系数数目、NMSE,从中可以看出 MRF 模型比 MP 模型具有更少的系数数目,同时 NMSE 降低了 1.84 dB;与 MLRF 模型相比, NMSE 降低了 5.16 dB。

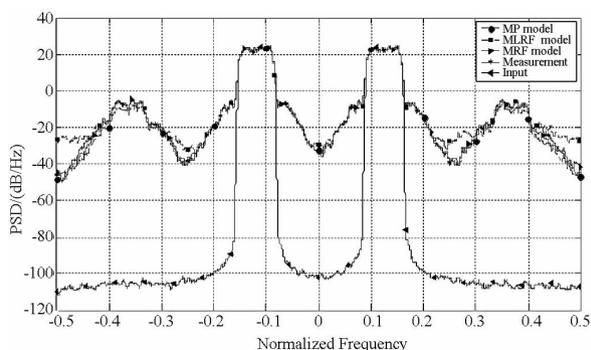


图 4 WCDMA1001 测试与模型输出频谱

Fig. 4 Measured and estimated PA's output spectrum of WCDMA1001

表 1 不同模型的性能比较

Tab. 1 Performance comparison between different models

模型	模型维数	系数数目	NMSE (dB)
MP ^[1,5]	$(P, Q) = (8, 5)$	48	-34.63
MLRF ^[1,9]	$(P_N, P_D) = (8, 8)$	16	-31.23
MRF	$(P_N, Q_N, P_D, Q_D) = (2, 8, 3, 5)$	36	-36.47

4 结束语

本文在对功放的记忆 MP 模型、MLRF 模型研究的基础上,提出了一种基于 MRF 的功放行为模型。详细分析了 MRF 模型的实现、模型系数辨识方法以及其记忆深度和非线性阶数的选取方法。实验结果表明,与 MP 模型、MLRF 模型相比,新模型具有更好的逼近精度,同时降低了计算复杂度,便于应用在预失真系统中,以补偿功率放大器的非线性失真和记忆效应。

参考文献 (References)

- [1] Pedro J C, Maas S A. A comparative overview of microwave and wireless power amplifier behavioral modeling approaches [J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2005, 53(4): 1150-1163.
- [2] Isaksson M, Wisell D, Ronnow D. A comparative analysis of behavioral models for RF power amplifiers [J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech, 2006, 54(1): 348-359.
- [3] Saleh A. Frequency independent and frequency dependent nonlinear models of TWT amplifiers [J]. IEEE Trans. Commun., 1981, 29(11): 1715-1720.
- [4] Rapp C. Effects of HPA-nonlinearity on a 4-DPSK/OFDM-signal for a digital sound broadcasting signal [C]//Proceedings of Second European Conf. on Sat. Comm., Liege, Belgium, 1991: 179-184.
- [5] Ding L, Zhou G T, Morgan D R, et al. A robust digital baseband predistorter constructed using memory polynomials [J]. IEEE Trans. Commun., 2004, 52(1): 159-165.
- [6] Crespo-Cadenas C, Reina-Tosina J, Madero-Ayora M J. Volterra behavioral model for wideband RF amplifiers [J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2007, 55(3): 449-457.
- [7] Yao K, Niu W, Wang M. Adaptive RLS algorithm for rational function predistorter [C]//Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference, 2005.
- [8] Huang D, Leung H, Huang X. A rational function based predistorter for high power amplifier [C]//Proceedings of the 2004 International Symposium on Circuits and Systems, 2004: 1040-1043.
- [9] Mahil S, Sesay A B. Rational function based predistorter for traveling wave tube amplifiers [J]. IEEE Trans. Broadcast., 2005, 51(1): 77-83.
- [10] Cunha T R, Lavrador P M, Lima E G, et al. Rational function-based model with memory for power amplifier behavioral modeling [C]//Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-Wave Circuits (INMIC), 2011: 1-4.
- [11] 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 Microw. Wireless Compon. Lett, 2008, 18(5): 359-361.
- [12] Nocedal J, Wright S J. Numerical optimization [M]. 2nd ed. New York: Springer, 2006.
- [13] Hammi O, Younes M, Kwan A. Performance driven dimension estimation of memory polynomial behavioral models for wireless transmitters and power amplifiers [J]. Progress In Electromagnetics Research C, 2010, 12: 173-189.
- [14] Agilent Technologies. Connected simulation and test solutions using the Advanced Design System [R]. Applications Notes, No. 1394, 2000.