

## 适用于宽带通信系统的 DHW 功放模型

南敬昌, 李厚儒, 张智栋, 杜学坤

(辽宁工程技术大学 电子与信息工程学院, 辽宁, 葫芦岛, 125105)

**摘 要:** 为有效模拟宽带通信系统中功放的非线性行为, 研究了一种双路 Hammerstein-Wiener(DHW) 功放模型. 分别施加相同的激励信号于该模型的 Hammerstein 分支和 Wiener 分支, 并将两分支输出信号累加作为最终的响应. 利用 NXP 功放管进行 Doherty 电路设计并加入多载波 WCDMA 信号驱动, 从 ADS 中导出强非线性输入输出数据进行模型实验测试. 结果显示阶数相同条件下, 与 Hammerstein 和 Wiener 模型相比, 此双路 Hammerstein-Wiener 功放模型能够获得更好的 RMSE. 另外, 该功放模型可在减少整个记忆多项式参数数量 30%~40% 的前提下, 获得与记忆多项式模型近似相同的性能, 对功放系统行为模型的研究具有重要的参考价值.

**关键词:** 宽带通信; 功率放大器; Hammerstein 模型; Wiener 模型

**中图分类号:** TN722.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7180(2013)07-0149-05

## DHW Power Amplifier Model Applied to Broadband Communication System

NAN Jing-chang, LI Hou-ru, ZHANG Zhi-dong, DU Xue-kun

(School of Electrics and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** In order to simulate the PA nonlinear behavior of a wideband communication system effectively. In this paper, a two-way Hammerstein-Wiener PA model is investigated. Applying the same excitation signal to double branch model with Hammerstein in one branch and Wiener in the other, then regards the addition of two branch models' output as the final response. Model test is conducted by the strong nonlinear input and output data exported from the DPA circuit which is designed by NXP PA models and driven by multi-carrier wave WCDMA signal in ADS circumstance. As a result, the DHW model can acquire better RMSE compared with the Hammerstein and Wiener model. In addition, the performances of the double Hammerstein-Wiener model is similar to that of the memory polynomial model with a 30% to 40% reduction in the number of parameters, which has great reference value for research of PA behavior model.

**Key words:** broadband communication; power amplifier; Hammerstein model; Wiener model

### 1 引言

随着对能源节约和通信质量等问题重视程度的日益提高, 宽频带和高效率逐渐成为现代无线通信的发展趋势. 3G 通信系统常采用连续发射, 故功率放大器在整个通信系统中扮演尤为重要的角色. 从功放的角度出发, 现代移动通信系统面临的主要困难来自于对频谱效率的要求, 高的频谱效率要求有

高的线性度. 因此, 在提高功放效率的同时, 确保较好的线性度已成为当前无线通信领域研究的热点话题. Doherty 技术因实现相对简单, 且能够同数字预失真技术相结合, 在确保线性度的同时使功放效率得到提高, 从而获得了业内的广泛青睐. 在射频领域中, 功率放大器和无线发射设备建模是非常有价值的研究方向, 各种参数化和非参数化模型被提出来描述宽带通信系统的静态非线性行为和动态记忆效

**收稿日期:** 2012-10-02; **修回日期:** 2012-11-15

**基金项目:** 国家自然科学基金(60971048); 辽宁工程技术大学研究生科研项目(Y201201401)

应. Volterra 模型是已经建立的综合模型,包括静态和动态效应.简化的 Volterra 模型包括记忆多项式模型和基于模块的模型<sup>[1-3]</sup>.各种并行结构模型已被提出用于描述功率放大器的记忆效应.这类模型包括记忆多项式模型<sup>[4]</sup>、并行 Hammerstein 模型和并行 Wiener 模型等.

Hammerstein 模型和 Wiener 模型是最简单的基于模块的模型,一个静态非线性函数块后置或者前置于一个线性动态滤波模块.并行的 Hammerstein 模型和并行的 Wiener 模型具有更高的自由度,可以捕捉到被传统 Hammerstein 模型或 Wiener 模型遗漏的行为.本文研究的双路 Hammerstein-Wiener 并行结构模型<sup>[5]</sup>,相比于简单地重复同一子模型来说,能更好地捕捉到一些特定的非线性行为,这种系统的拓扑结构相比于 Hammerstein 模型或者是 Wiener 模型能更精确地辨识,这是由于第二路分支能够进一步自适应没有被第一路分支捕捉到的失真,从而提高模型的总体性能.本文对一高功率 Doherty<sup>[6]</sup>功放进行四种模型(包括 Wiener, Hammerstein, 双路 Hammerstein-Wiener 以及记忆多项式)的模拟,并将各模型的性能进行了比较.

## 2 宽带通信系统

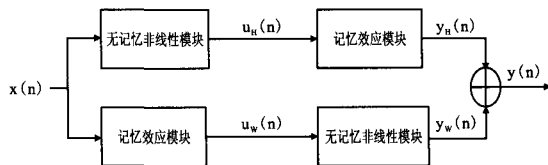
无线通讯的快速发展使得有限的频谱资源与增加的通讯方式产生了矛盾.为确保通讯的保密与畅通,宽带通讯随之产生.适用于宽带通信系统的射频发射设备的设计和实现必须要同时考虑到许多不一致的要求和标准,是一项十分艰巨的任务.其中保证信号频谱内容在分配带宽内是特别重要的.当线性和非线性失真遍及整个发射设备时,这个基本的约束条件将会被严重打破,尤其是在功率放大阶段,失真将导致带外和带内的辐射.在宽带信号应用和传输中,这些不良的频率产物将引起严重的损害,例如 WCDMA 和 OFDM 的信号包络历经强波动会导致高峰均功率比.为补偿这些失真,需要应用适当的模型精确的描述发射设备的特点.上述宽带指的是器件本身带宽同传输信号的带宽是可比的.

在以往研究的窄带通信系统中功放的记忆效应较弱,所以分析放大器的非线性行为时通常不考虑.然而在宽带通信系统中,随着输入信号带宽的不断加,功放的记忆效应引起的放大器 AM-AM 和 AM-PM 变换特性的改变趋于显著.随着 WCDMA 和 OFDM 等宽带通信的飞速发展,如何有效精确模拟宽带通信系统中的记忆效应成为功放模型研究的

主要课题.

## 3 DHW 模型

并行 Hammerstein 模型和并行的 Wiener 模型属于同一类,它们具有更高的自由度,可以捕捉到被传统 Hammerstein 模型或 Wiener 模型遗漏的行为.此类模型是多分支系统,它们被提供相同的输入信号并且把输出信号相累加作为最终的响应<sup>[7-8]</sup>.就所有分支结构的 Hammerstein 模型或者是 Wiener 模型而言,这类结构有统一的子模型.基于以上模型构建思路,本文提出了 DHW 模型,其中一路分支采用 Hammerstein 模型结构,另一路分支则采用 Wiener 模型结构.图 1 为 DHW 模型结构图.



这个系统描述了 DHW 模型是 Wiener 模型和 Hammerstein 模型输出的累加,如(1)式所示:  $y(n) = y_H(n) + y_W(n)$  (1)

$y(n)$  是整个模型的输出,  $y_H(n)$  和  $y_W(n)$  分别是 Hammerstein 和 Wiener 子模型的输出.

Hammerstein 子模型的输出信号  $y_H(n)$  代表了双路 Hammerstein-Wiener 并行结构模型的第一路分支,公式给出如(2)所示:

$$\begin{cases} y_H = \sum_{j=0}^{m_b} b_j \cdot u_H(n-j) + \sum_{k=1}^{m_a} a_k \cdot y_H(n-k) \\ u_H(n) = \sum_{i=1}^{m_c} c_i \cdot x^{i-1}(n) \end{cases} \quad (2)$$

其中  $a_k$  和  $b_j$  分别是 Hammerstein 子模型的自回归滤波器的反馈和前馈系数,  $m_a$  和  $m_b$  分别是 Hammerstein 子模型的自回归滤波器的反馈和前馈部分的阶数,  $c_i$  和  $m_c$  分别代表 Hammerstein 子模型静态非线性函数的系数和非线性阶数. Wiener 子模型的输出信号  $y_W(n)$  代表了双路 Hammerstein-Wiener 模型的第二路分支,公式给出如(3)所示:

$$\begin{cases} y_W(n) = \sum_{l=1}^{m_d} d_l \cdot u_W(n)^{l-1} \\ u_W = \sum_{p=0}^{m_h} h_p \cdot x(n-p) + \sum_{q=1}^{m_s} s_q \cdot u_W(n-q) \end{cases} \quad (3)$$

其中  $h_p$  和  $s_q$  分别是 Wiener 子模型的自回归滤波器的反馈和前馈系数.  $m_h$  和  $m_s$  分别是指 Wiener 子模型的自回归滤波器的反馈和前馈部分的阶数.  $d_l$  和  $m_d$  是 Wiener 子模型静态非线性函数的系数和非线性阶数.

由此可见,该模型的复杂度是单个 Hammerstein 模型或 Wiener 模型的二倍.对并行结构来说参数的增加已成为一个不可避免的趋势(例如本文提出的 DHW 模型和记忆多项式模型),不仅是因为从辨识方面,而且还从数字实现以及记忆因素方面考虑,这些都使得它在实际情况下难以实现,并且费用昂贵.本文提出的模型仅两路分支以及合理的参数,相比于等同意义下的记忆多项式模型来说,此模型更容易实现.然而,当训练信号样本的数目增加时,相比于简单的 Hammerstein 模型和 Wiener 模型,此模型参数数目的增加能显著地减缓总体辨识方法的速度.本研究中,一个迭代“两步法”<sup>[9]</sup> 辨识被应用,每次仅需要处理一半参数(双路分支模型中的一个分支),并且使用最小化算法将另一半参数的影响考虑在内.这样不仅加快了辨识的进程,而且还保持了整个系统的相互作用.

在本文中,Hammerstein 模型和 Wiener 模型中的自回归结构被设定在一个有限的脉冲响应滤波器中.因此,模型的输出  $y(n)$  可以表示成输入  $x(n)$  的一个函数:

$$y(n) = \sum_{j=0}^{m_b} \sum_{i=1}^{m_c} b_j \cdot c_i \cdot [x^{i-1}(n-j)] + \sum_{l=1}^{m_d} d_l \left[ \sum_{p=1}^{m_h} h_p \cdot x(n-p) \right]^{l-1} \quad (4)$$

## 4 模型性能评估及仿真实验结果

### 4.1 实验设置和测试条件

本研究采用的被测设备是一个高功率强非线性非对称 Doherty 功率放大器,适用于工作在 3G 频段的 WCDMA 信号条件下.实验具体操作方法为:在 ADS 中导入 NXP 公司的 BLF6G38-25 功放模型作为载波功放,进行单管功放设计,使其输出功率为 25W 时附加效率达到峰值.采用 NXP 公司的 BLF6G38-50 功放模型作为峰值功放,进行单管功放设计,使其输出功率为 50W 时附加效率达到峰值.对 DPA 功放模型相关参数进行设置,加入三载波 WCDMA 信号驱动,其包络仿真原理图如图 2 所示.

通过仿真提取输入输出的包络数据.该实验采

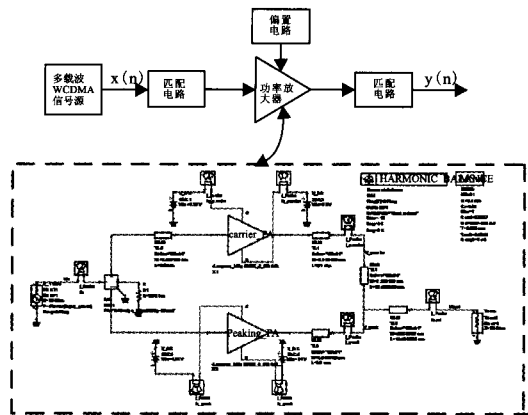


图2 功放包络仿真原理图

用了 8000 个数据点用于建模仿真.建模过程在 matlab 环境下实现,利用测得输入以及输出数据建立四个模型(包括 Hammerstein 模型, Wiener 模型, DHW 模型以及记忆多项式模型).模型验证阶段,从时域和频域两个方面把各模型输出数据与实测输出数据作对比,并对各模型的性能进行比较.

$$NMSE = 10 \cdot \log_{10} \left\{ \frac{\sum_{N=1}^L |y(n) - y^*(n)|^2}{\sum_{N=1}^L |y(n)|^2} \right\} \quad (5)$$

双路 Hammerstein-Wiener 并行结构模型性能被估测,并且与 Hammerstein 模型, Wiener 模型和记忆多项式模型进行比较. Hammerstein 模型和 Wiener 模型分别用公式(2)和(3)描述(考虑到线性滤波器工作在有限脉冲响应和无自回归结构的条件下作了适当的调整).记忆多项式模型输入输出的关系给出如下<sup>[10]</sup>:

$$y^*(n) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^M a_{ij} \cdot x(n-j) \cdot |x(n-j)|^{i-1} \quad (6)$$

$x(n)$  和  $y^*(n)$  分别是记忆多项式模型输入和估计的输出.  $N$  和  $M$  是模型的非线性阶数和记忆阶数.

### 4.2 性能评估结果

表 1 中总结了四个模型中每个模型的系数数目和 NMSE 结果.参数的总数指的是实系数的数目.对于 Hammerstein 模型、Wiener 模型、DHW 模型,静态的非线性函数有复系数,而线性滤波器的系数有实值.所有的记忆多项式模型的系数为复数值.

如表 1 所示,给定阶数条件下, DHW 模型能够获得最好的 RMSE 性能.相比于 Hammerstein 模

型或者是 Wiener 模型, DHW 模型能够使 RMSE 得到改善. 尽管 RMSE 的改善看起来是有限的, 但特别需要强调的是记忆效应模型对于 RMSE 的影响亦是有限的, 并且受到静态非线性的控制. DHW 结构模型只需在得到记忆多项式(MP)模型所需系数 60% 至 70% 的条件下, 就可获得与其近似的 RMSE.

表 1 给定阶数条件下模型的辨识系数数目与 RMSE 的比较

| 模型          | 阶数      | 系数数目 | RMSE(dB) |
|-------------|---------|------|----------|
| Hammerstein | 4/4     | 12   | 2.6344   |
| Wiener      | 4/4     | 12   | 2.6382   |
| MP          | 4/4     | 32   | 2.5987   |
| DHW         | 4/4/4/4 | 24   | 2.5768   |
| Hammerstein | 6/4     | 16   | 2.5962   |
| Wiener      | 4/6     | 16   | 2.6000   |
| MP          | 6/4     | 48   | 2.5788   |
| DHW         | 6/4/4/6 | 32   | 2.5632   |
| Hammerstein | 8/4     | 20   | 2.5826   |
| Wiener      | 4/8     | 20   | 2.5884   |
| MP          | 8/4     | 64   | 2.5456   |
| DHW         | 8/4/4/8 | 40   | 2.5417   |

Hammerstein 模型阶数:  $m_c/m_b$

Wiener 模型阶数:  $m_h/m_d$

MP 模型阶数:  $N/M$

DHW 模型阶数:  $m_c/m_b/m_h/m_d$

时域分析: 图 3 和图 4 分别给出 DHW 功率放大器模型的幅度—幅度调制以及幅度—相位调制特性, 由图可见, DHW 功放模型输出的预测值和实际功放的测量值十分吻合. 甚至在信号幅度很小时也可以保证预测值同测量值的较好拟合.

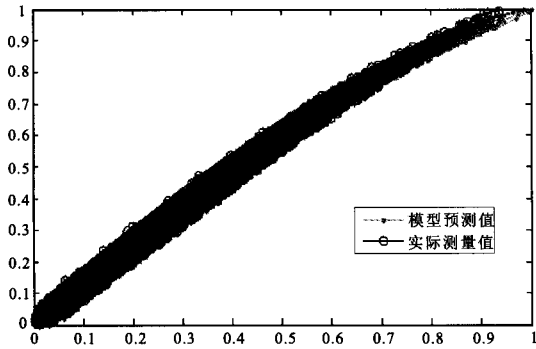


图 3 幅度—幅度调制

频域分析: 图 5 中输入的信号为 3 载波 WCDMA 信号, 在 8 阶非线性条件下 (DHW 模型和记忆

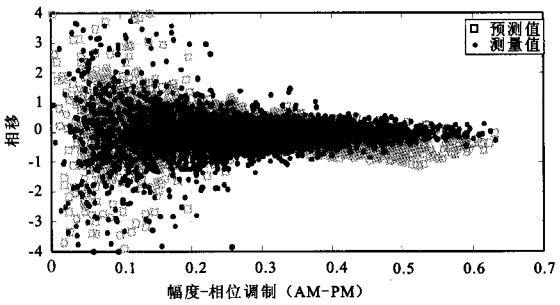


图 4 幅度—相位调制

多项式模型在输出端可获得较好的 RMSE 性能) 得到如图所示的输出端频谱估计. 此图将功放实际输出频谱与 DHW 模型和记忆多项式模型的输出频谱进行对比, 可以看出两模型的预测频谱与测量频谱在 30MHz 的频宽内保持高度一致, 同时与表 1 中给出的 RMSE 的结果相符合, 说明了两模型都能够精确估计出输出频谱. 与记忆多项式模型相比, DHW 模型只需得到其 60% 至 70% 的系数数目, 就可获得与记忆多项式模型近似相等的 RMSE.

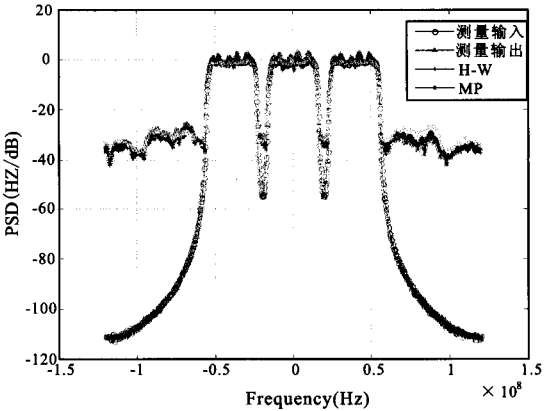


图 5 DHW 模型与记忆多项式模型功率谱密度图对比

5 结束语

本文研究了一种适用于宽带通信系统的带记忆效应的 DHW 功放模型. 实验中用该模型模拟多载波 WCDMA 信号驱动的 3G 高功率 Doherty 放大器. 结果表明, 这种双路结构相比于 Hammerstein 系统或者是 Wiener 系统能更精确地辨识. 用 DHW 模型作为测量基准与 Hammerstein 模型、Wiener 模型和记忆多项式模型相对比, 在一给定阶数条件下, 可以看出 DHW 模型比单路 Hammerstein 模型和 Wiener 模型获得了更好的 RMSE 性能. 此外, 该模型在只需记忆多项式模型所需系数的 60% 至 70% 的条件下, 即可获得与多项式模型近似相等的 RMSE.

## 参考文献:

- [1] Morgan D R, MA Zhengxiang, KIM J, et al. A generalized memory for digital polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2006, 54(10): 3852-3860.
- [2] Isaksson M, Wisell D, Ronnow D. A comparative analysis of behavioral models for RF power amplifiers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(1): 348-359.
- [3] 丁元明, 王甲凯. 模块化模型功率放大器的自适应预失真[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(29): 114-117.
- [4] 黄圣, 胡泽鑫, 龚文斌. 一种具有普适性的功放线性化预失真方案[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(5): 1854-1857.
- [5] Fadhel M Ghannouchi, Farzaneh Taringou, Oualid Hammi. A dual branch hammerstein-wiener architecture for behavior modeling of wideband RF transmitters[J]. Microwave Symposium Digest (MTT), 2010: 1-1.
- [6] Kim J, Fehri B, Boumaiza S, et al. Power efficiency and linearity enhancement using optimized asymmetrical doherty power amplifiers[J]. IEEE Trans on Microwave Theory Tech, 2011, 59(2): 425-434.
- [7] Li Hui, Wang Desheng, Chen Zhaowu, et al. A filterbank-based parallel hammerstein predistorter for high power amplifier linearization[C]//Telecommunications and Malaysia International Conference on Communications penang: IEEE, 2007: 627 - 631.
- [8] Ku H, Mckinley M D, Kenney J S. Quantifying memory effects in RF power amplifiers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(12): 2843-2849.
- [9] 钱业青, 刘富强. Wiener 功率放大器的简化预失真方法[J]. 通信学报, 2007, 28(10): 55-59.
- [10] Li Zhengdai, Dewei Yang, Jingming Kuang, et al. A new joint memory polynomial and look-up-table predistorter algorithm design[C]//proceedings of the 7th International conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM). Wuhan: IEEE, 2011: 1-4.

## 作者简介:

南敬昌 男, (1971—), 博士, 教授. 研究方向为射频电路与系统、信号处理与信息编码、通信系统仿真等.

李厚儒 女, (1988—), 硕士研究生. 研究方向为射频功放模型与仿真技术.

张智栋 男, (1986—), 硕士研究生. 研究方向为射频电路及放大器设计、线性化技术等.

杜学坤 男, (1988—), 硕士研究生. 研究方向为微波/射频电路与器件设计、线性高效率功率放大器设计.