

# 射频功放建模及其延时匹配的研究

赵晓晨, 邱应强, 盛艳萍, 黄华灿

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 介绍了记忆多项式模型结构, 使用载波频率为 2.14 GHz、带宽 5 MHz 的单载波 3GPPFDD WCDMA 信号作为测试信号, 经过一个额定输出功率为 8 W 的射频功率放大器, 并采用基于查找表的记忆多项式方法对其建模。采用了快速的延时匹配算法, 有效抑制了延时估计偏差及输入输出信号相位幅度的改变对建模的影响。

**关键词:** 数字预失真; 射频功放建模; 记忆多项式; 延时匹配

中图分类号: TP802+.7

文献标识码: A

## Research of RF power amplifier models and time delay matching

ZHAO Xiao Chen, QIU Ying Qiang, SHENG Yan Ping, HUANG Hua Can

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** This paper describes a memory polynomial model structure, using the carrier frequency of 2.14 GHz, the 3GPPFDD WCDMA signal with 5 MHz bandwidth single carrier as the test signal, through a rated output power of 8 W of RF power amplifiers and using the look-up table-based memory polynomial method for its modeling. Using fast time delay matching algorithm, effectively inhibited the delay estimation error and the impact of modeling invidied by the input and output signal's phase and magnitude changes.

**Key words:** digital predistortion; RF power amplifier modeling; memory polynomial; time delay matching

数字预失真技术具有电源效率高、功放成本低、散热量小、系统实现难度低等优越性。同时随着数字技术的高速发展, 使得数字预失真系统的实现成本越来越低, 而性能却不断得到提高。由于数字预失真系统自身所具备的各种优势, 它正逐渐成为未来无线通信系统中射频大功率放大器的主要线性化技术。在 WCDMA 基站和移动台的发射机中, 从复杂性和成本的角度出发, 最重要的成分是射频(RF)部分的功率放大器。由于系统采用了带宽受限的线性调制方式, 邻信道载波间的频谱泄漏取决于功率放大器(PA)的线性。此外, 宽带射频功率放大器也会呈现出严重的电记忆效应, 其非线性呈现为动态的非线性<sup>[1-2]</sup>。因此, 建立射频功放的动态非线性模型显得至关重要。有记忆预失真的研究已经成为数字预失真领域的一个新兴的研究方向。

### 1 记忆多项式模型

无记忆效应的失真是由功放的 AM/AM 和 AM/PM 失真引起的, 输出信号的幅度和相位变化是当前输入信

号幅度的函数。随着信号带宽的增加, 如 WCDMA 和 WIMAX 等信号, 功放的记忆效应对信号传输影响变得很大。功放的记忆效应是由于有源器件的偏置网络的温度系数具有频率特性造成的。其结果是, 功放当前的输出信号不仅与当前的输入信号相关, 而且与过去的输入信号相关。对于强记忆效应功放, 仅仅使用不带记忆效应的预失真器进行补偿其效果非常有限。因此, 为了更好地补偿记忆功放的非线性, 功放预失真器的设计也必须考虑记忆效应。

在非线性系统理论中, 经常采用记忆多项式、wiener 模型、Hammerstein 模型、Volterra 级数模型建立记忆性非线性系统。在以上模型中, Volterra 级数模型最为准确, 但其系数的提取较为复杂, 没有太大的实用价值。wiener 模型和 Hammerstein 模型的参数最少而且最容易通过数字器件来实现, 但是如何准确有效地识别其模型参数依然是非常艰巨的任务。本文采用记忆多项式的识别算法实现对射频功放模型的建立, 由于记忆多项式的参数较

## 网络与通信 Network and Communication

多,所以采用查找表来实现记忆多项式模型结构,大大减小了计算复杂度<sup>[2]</sup>。

根据记忆效应的定义,可以通过完整的多项式来表征其系统函数<sup>[3]</sup>:

$$z(n) = \sum_{q=0}^Q \sum_{k=0}^K a_{qk} x(n-q)^k \quad (1)$$

其中,  $x(n) = I_{in}(n) + Q_{in}(n)$ ,  $z(n) = I_{out}(n) + Q_{out}(n)$ 。  $x(n)$  表示射频功放的输入信号,  $z(n)$  表示射频功放的输出信号, 系数  $a_{qk}$  为复数,  $K$  表示多项式的阶数, 表征了记忆多项式非线性,  $Q$  表示多项式的记忆深度, 表征了记忆多项式模型的记忆效应。

若采用传统的用于识别记忆多项式模型的间接训练结构, 则:

$$u(n) = y(n)/G \quad (2)$$

其中  $y(n)$  为经过功放放大后的信号,  $G$  为功放的额定放大倍数。

当算法收敛时:

$$z = Ua \quad (3)$$

其中:

$$z = [z(0), \dots, z(N-1)]^T \quad (4)$$

$$U = [u_{00}, \dots, u_{k0}, \dots, u_{0Q}, \dots, u_{kQ}] \quad (5)$$

$$u_{kq} = [u_{kq}(0), \dots, u_{kq}(N-1)]^T \quad (6)$$

$$a = [a_{00}, \dots, a_{k0}, \dots, a_{0Q}, \dots, a_{kQ}]^T \quad (7)$$

采用最小二乘法可以直接求得:

$$\hat{a} = (U^T U)^{-1} U^T z \quad (8)$$

为减少计算复杂度, 将(1)式改写为:

$$z(n) = \sum_{q=0}^Q x(n-q) \sum_{k=0}^K a_{qk} x(n-q)^{k-1} = \sum_{q=0}^Q x(n-q) LUT_q(|x(n-q)|) \quad (9)$$

其中,  $LUT_q(|x(n-q)|)$  表示对记忆多项式中的每个单位延迟  $q$  构建 1 个相应的查找表。  $|x(n-q)|$  表示输入信号幅度作为查找表的地址索引, 从而可方便地找到相应的多项式系数, 且大大减少了计算的复杂度<sup>[3]</sup>。

## 2 延时匹配

目前, 绝大部分的研究都没有考虑预失真回路中延时估计误差的影响。在预失真回路中, 信号经过预失真、D/A 转换、调制、上载频、放大, 再解调下载频后反馈回来, 必然会经历一定的传播延时, 即使对于无记忆放大器, 在实际实现预失真器的自适应时, 都需要对参考信号进行适当的延时估计。除了在信号处理领域中常用的各种延时匹配算法外, 参考文献[4]分别根据调制信号的特性和采用校准信号的方法提出了一些适合预失真的延时匹配算法, 但由于放大器非线性失真的影响, 使得实现严格的延时匹配仍然并非易事。因此, 延时估计误差将不可避免地存在。预失真器通常可采用查询表和多项式函数 2 种形式实现。在查询表预失真中, 参考文献[5]指出延时的正确匹配是自适应预失真的前提, 延时匹配的误差将直接严重影响系统的线性化性能, 甚至

引起查询表的误调整。

本文采用传统的互相关算法解决上述问题, 假设输入信号为  $x(n)$ , 输出信号为  $z(n)$ , 采用公式找出互相关数值最大的点。

$$y(i) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N x(n) \times z_i(n) \quad (10)$$

其中,  $z_i(n)$  为输出  $z(n)$  循环移动  $i$  位后的序列。假设计算得到的互相关数值最大的点是  $z(n)$  的第  $y$  个, 则对  $z(n)$  移位  $y-1$ , 做到与  $x(n)$  匹配。该算法准确度高, 但计算复杂度也高, 因此采用抽取加细调的方法, 如图 1 所示。其原理是每隔  $m$  (假设  $m=5$ ) 个数据取 1 个, 得到一组新的数据序列, 对抽取的这些样本利用式(10)进行互相关运算并找出最大值对应的那个数据  $x$ , 对  $x$  附近的  $n$  个值 (原样本中的) 再次利用式(10)进行运算, 所得结果即为所求。利用这种算法可大大减小算法复杂度, 且  $m$  的值越小, 准精度越高。根据不同的序列选择合适的  $m$ , 则准确度与原算法相同。

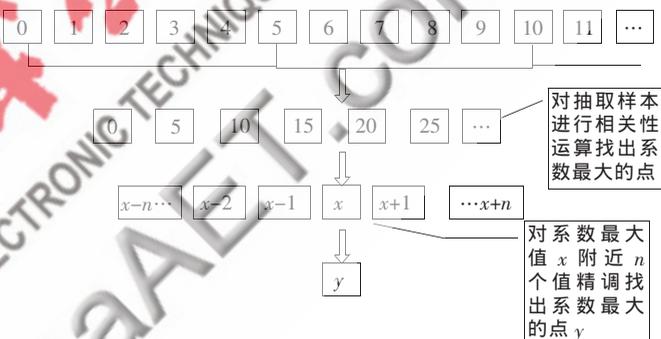


图 1 抽取样本法求取互相关最大值原理图

## 3 实验结果及分析

实验采用安立仪器采集产生标准的 3GPP FDD WCDMA 的标准 test 信号作为输入信号, 在仪器中经过 D/A 转换、调制、上载频, 经过放大器及衰减器后, 再经解调下载频后反馈回来, 以此信号作为输出信号。功放采用由美国飞思卡尔公司生产的功放管做成的额定功率为 8W 的放大器, 其工作频率为 2 110~2 170 MHz。由于输入与输出信号存在一定的延时, 再加上信号经过功放与衰减器后产生的失真, 因此首先对输出信号采用延时匹配算法进行调整, 确保输入输出同步, 然后运用输入信号及延时匹配移位后的输出信号, 采用基于查找表的记忆多项式的算法进行建模, 记忆深度为 4, 非线性阶数为 10。

由图 2 和图 3 可以看出, 采用快速的延时匹配算法与信号校准相配合, 有效地抑制了延时估计偏差及输入输出信号相位幅度的改变对建模的影响, 可得到理想功放的 AM-AM, AM-PM 特性曲线。由图 4 和图 5 可以看出, 基于查找表的记忆多项式模型的频谱与实际测试功放的频谱几乎一致, 效果良好。

本文将快速的延时匹配算法与信号校准相配合, 有

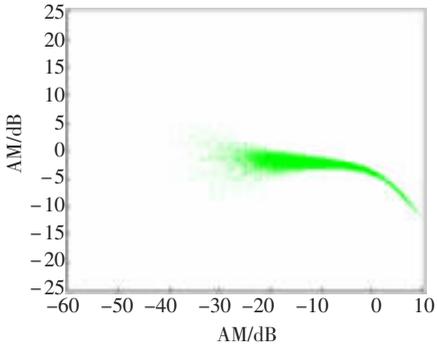


图2 信号的AM-AM特性曲线

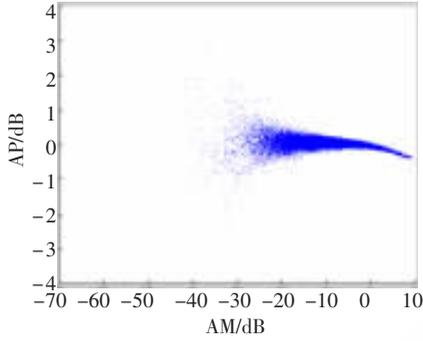


图3 信号的AM-PM特性曲线

变对建模的影响。采用基于查找表的记忆多项式方式对功放建模,效果良好、复杂度低、便于硬件实现,为进一步制定合理的预失真方案打下基础。

参考文献

[1] KIM J, KONSTANTINO K. Digital pre-distortion of wideband signals based on power amplifier model with memory [J]. Electron Lett, 2001, 37:1417-1418.  
 [2] RAICH R, QIAN H, ZHOU G T. Digital baseband predistortion of nonlinear power amplifiers using orthogonal polynomials[C]. in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing, 2003:689-692.

[3] 吴樟强,刘太君,任坤胜,等.基于记忆多项式的射频功放模型研究 [J]. 宁波大学学报(理工版), 2008, 21(3): 293-296.  
 [4] YANG Y, WOO Y Y, BUMMAN Kim. New predistortion linearizer using low-frequency even-order intermodulation components [J]. IEEE Transactions on Microw Theory Tech, 2002, 50(2):446.  
 [5] MANNINEN P. Effect of feedback delay error on adaptive digital predistortion [J]. Electronics Letters, 1999, 35 (14): 1124.

(收稿日期:2009-11-13)

作者简介:

赵晓晨,男,1984年生,硕士研究生,主要研究方向:通信与信号处理。

黄华灿,男,1948年生,教授,硕士生导师,主要研究方向:视频处理与传输电子系统与专用集成电路设计。

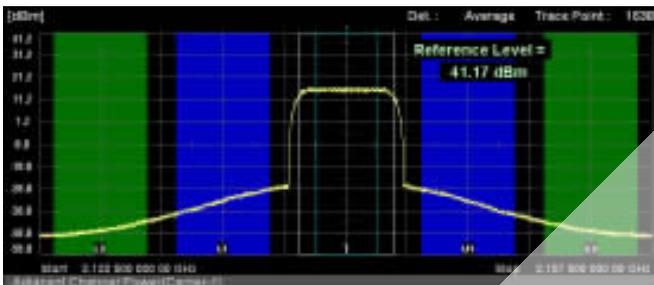


图4 实际测试功放频谱图

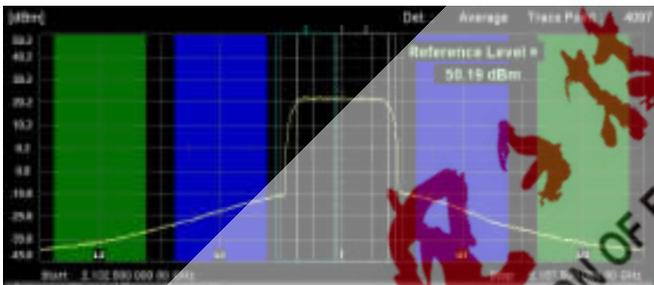


图5 建模后信号的频谱图

效抑制了延时估计偏差及输入输出信号相位幅度的改