

基于 Saleh 函数的功放行为模型研究

张玉梅, 南敬昌

(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: 如何精确地模型功率放大器以及模型的适用情况是系统仿真时重要的研究方面. 文中在原始 Saleh 模型的基础上, 提出了基于 Saleh 函数的无记忆和有记忆的非线性功放模型. 利用 Freescale 半导体晶体管 MRF21030 器件模型及设计的电路从 ADS 中导出输入输出数据, 对两种模型进行了仿真实现, 得出了归一化均方根误差, 并和多项式模型误差进行比较. 结果表明, 该模型简化了原 Saleh 模型的结构和减少了系数, 能够精确描述功率放大器的非线性和记忆效应, 适用于弱非线性系统电路中.

关键词: 功率放大器; 行为模型; 非线性; 记忆效应; Saleh 函数

中图分类号: TN722.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)12-0121-03

Study of Behavior Models Based on the Saleh Function for Power Amplifier

ZHANG Yu-mei, NAN Jing-chang

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

Abstract: The important aspects of system simulation are the application of the model and how to accurately model the behavior of power amplifiers. In this paper, we propose the memoryless and memory non-linear power amplifier models on the basis of the original Saleh model. Utilizing input and output data extracted from freescale semiconductor transistor MRF21030 model and designed circuit in ADS circumstance, simulate two kinds of models, compute normalized root mean square error (NRMS) and compare with error of the polynomial model. The results show that the proposed models have a simplified structure and reductive coefficients than the original Saleh model, describe the nonlinearity and memory effects for power amplifier accurately, be applied in the weak non-linear systems circuit.

Key words: power amplifier; behavioral models; nonlinearity; memory effects; Saleh function

1 引言

精确地模型功率放大器^[1]的行为以及各种模型的适用情况是重要的研究课题, 在进行系统仿真时, 需要采用合适的行为模型, 才能得到准确的系统仿真性能, 对实际设计具有重要的参考意义.

功放行为模型主要用于模拟通信子系统或模块的特性, 这种通信子系统用电路级或晶体管级模型会显得过于复杂而无法实现或者代价太大, 它通常被认为是黑盒模型, 完全依赖于一组所选择的输入输出测试数据, 而不需要知道功放的内部组成.

功率放大器的非线性^[2]是指当放大器输入信号的幅度逐步增加时, 输出信号会达到饱和状态, 输入输出呈现为非线性现象. 通常情况下, 窄带信号输入下功放的这些特性曲线是不变的, 可以表示为输入信号的功率级数. 然而, 在现代通信系统中, 输入信号是宽带的、非恒包络调制或多载波信号, 功放的特性随着输入信号包络的不同而变化, 这种情况下的功率放大器是存在记忆效应的, 即输出不仅与当前的输入有关系, 而且还和以前的输入有关系. 这种功放的的非线性特性随带宽而变化的现象称为记忆效应. 所以就射频功率放大器的非线性行为模型来说,

收稿日期: 2009-10-26; **收稿日期:** 2009-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(60971048); 辽宁省博士科研启动基金(20091033)

主要分为两类:无记忆非线性行为模型(窄带信号输入)和记忆非线性行为模型(宽带信号输入)。

文中在原始 Saleh 模型的基础上,提出了基于 Saleh 函数的无记忆和有记忆的非线性行为模型,并对提出的两种模型进行了仿真,并和多项式模型的误差进行了比较。目的是能够准确地反映出功率放大器的非线性和记忆效应,并应用于弱非线性系统电路中。

2 基于 Saleh 函数的行为模型

Saleh 函数因结构简洁,较少的参数能够实现数据的较好拟合,所以应用于功放的非线性模型中。通常使用的低通等效无记忆 Saleh 模型^[3]表达式如下:

$$A_y[A(t)] = \frac{\alpha_A A(t)}{1 + \beta_A [A(t)]^2} \quad (1)$$

$$\phi_y[A(t)] = \frac{\alpha_\phi A(t)^2}{1 + \beta_\phi [A(t)]^2} \quad (2)$$

这里 $x(t) = A(t)e^{j\phi(t)}$, α_A 、 β_A 、 α_ϕ 、 β_ϕ 是测量功放 AM/AM 特性 $A_y[A(t)]$ 和 AM/PM 特性 $\phi_y[A(t)]$ 的拟合参数。

2.1 无记忆 Saleh 函数模型

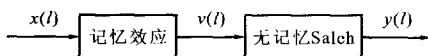
对复系数的多项式模型^[4]进行变换:

$$\begin{aligned} y(l) &= \sum_{k=1}^K a_{2k-1} |x(l)|^{2(k-1)} x(l) \\ &= \left(\sum_{k=1}^K a_{2k-1} |x(l)|^{2(k-1)} \right) \exp(j \cdot \arg[x(l)]) \\ &= \frac{\alpha |x(l)|}{1 + \beta |x(l)|^2} \exp(j \cdot \arg[x(l)]) \\ &= \frac{\alpha \cdot x(l)}{1 + \beta |x(l)|^2} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)即为所提出的无记忆 Saleh 函数模型的表达式,这里 α 、 β 是无记忆 Saleh 函数模型的参数,对比式(1)和式(2),此函数模型简化了原 Saleh 模型的结构和减少了系数。同时参数可以通过抽取测量的输入和输出数据,采用最小二乘法获得。

2.2 记忆 Saleh 函数模型

记忆 Saleh 函数模型即对无记忆 Saleh 函数模型引入了记忆效应,其结构如图 1 所示。



$$v(l) = \sum_{m=0}^{M-1} x(l-m) \quad (4)$$

$$y(l) = \frac{\alpha \cdot v(l)}{1 + \beta |v(l)|^2} \quad (5)$$

由式(4)和式(5)得,记忆 Saleh 函数模型表达式为:

$$y(l) = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \alpha_m x(l-m)}{1 + \sum_{m=0}^{M-1} \beta_m |x(l-m)|^2} \quad (6)$$

这里 $M-1$ 代表模型的记忆深度。记忆 Saleh 函数模型复系数的数量为 $2M$,结构简洁,和 Volterra 级数模型相比,系数大幅度的减少,和记忆多项式模型相比,系数也有一定的减少。此时参数也可以通过抽取测量的输入和输出数据,采用最小二乘法获得。

3 模型的仿真与分析

为了检验所提出的基于 Saleh 函数的无记忆和记忆非线性功放模型的性能,对这两种模型进行仿真,并进行分析,得出其适用情况。

3.1 模型的仿真

本次仿真所采用的输入输出数据是来自于 Freescale 半导体晶体管 MRF21030 所设计的功率放大器测试版得出的。从 ADS 中提取功率放大器的输入输出数据,功率放大器的详细设计参数参考文献[5]。放大器工作在非线性状态,即输出功率达到峰值(这里使输入信号的功率为 28dBm)。输入信号采用 WCDMA 基带信号,带宽约 5MHz,是具有一定的峰均功率比值和非恒包络信号,能够反映功率放大器的记忆效应。然后按照所提出模型的算法在 MATLAB 中编程实现,根据输入输出数据通过最小二乘法计算出模型系数,并利用该系数计算另一组输入数据功率放大器的输出,和实际输出数据进行比较,包括波形、频谱和均方根误差,进而得出提出模型的性能。

该实验采用了 4000 个数据点。输入信号的码速率为 3.84Mbps,采用取样速率为 $4 \times 3.84\text{Mbps}$,取样终止时间为 $1000/(4 \times 3.84\text{Mbps})$,这样就可以从 ADS 中提取出 4000 个输入输出数据点,用于仿真试验的输入输出数据。根据无记忆 Saleh 函数模型算法(式 3)和记忆 Saleh 函数模型算法(式 6)分别进行 MATLAB 编程仿真,得出模型的仿真结果。主要仿真结果有:无记忆 Saleh 函数模型的输出电压实部和虚部的波形以及功率谱如图 2~图 4 所示。记忆 Saleh 函数模型($M=4$)的输出电压实部和虚部的波形以及功率谱如图 5~图 7 所示。两种模型的测量输出与模型输出(计算输出)均方根误差

(RMSE)和归一化均方根误差(NRMS)并和多项式模型误差^[6]比较如表 1 所示。

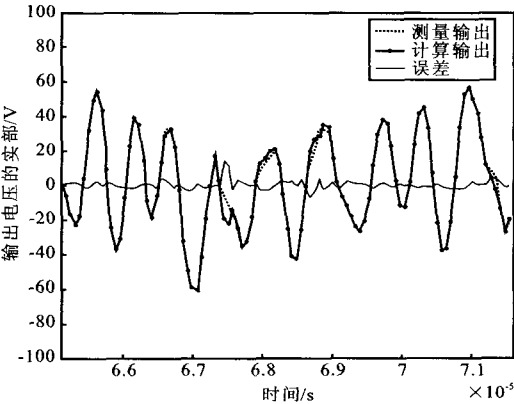


图 2 无记忆 Saleh 函数模型输出电压实部

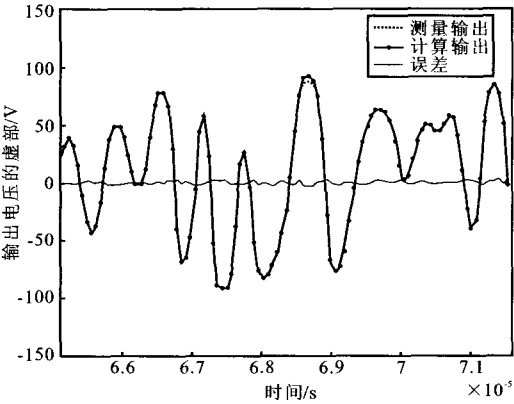


图 3 无记忆 Saleh 函数模型输出电压虚部

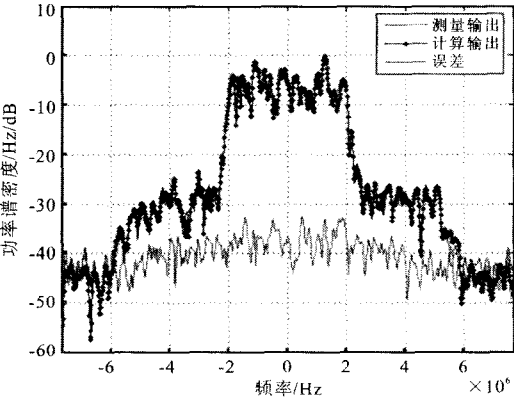


图 4 无记忆 Saleh 函数模型输出功率谱

表 1 Saleh 函数模型和记忆多项式模型的误差比较

模型\误差	RMSE	NRMS(dB)
无记忆 Saleh 函数模型	2.5753	-13.5861
记忆 Saleh 函数模型(M=4)	2.5408	-13.6447
记忆多项式模型(K=2,M=4)	3.1850	-12.6633
记忆多项式模型(K=3,M=4)	1.4555	-16.0643

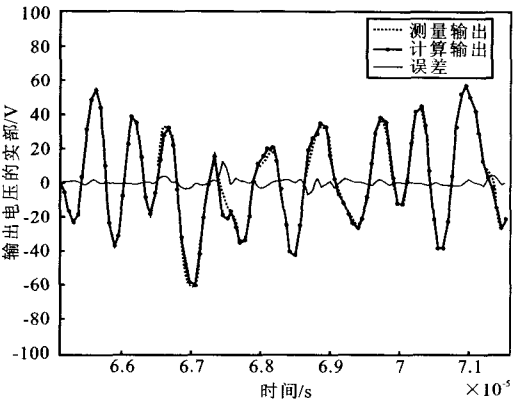


图 5 记忆 Saleh 函数模型(M=4)输出电压实部

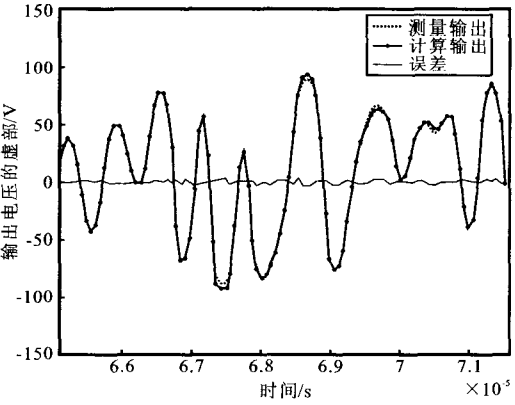


图 6 记忆 Saleh 函数模型(M=4)输出电压虚部

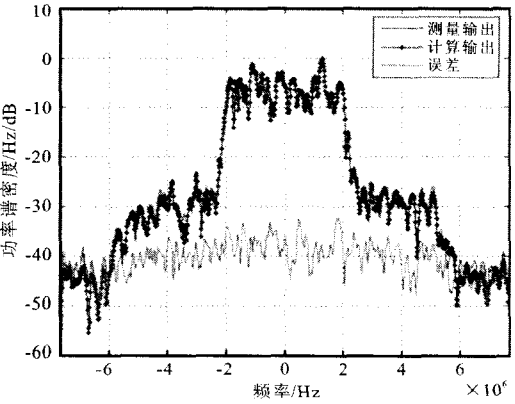


图 7 记忆 Saleh 函数模型(M=4)输出功率谱

3.2 模型的分析

从以上实际输出电压和模型输出的电压以及功率谱密度图看,输出波形接近实际测量的波形,一致性较好.因功率放大器的记忆效应失真只是非线性失真的一小部分,所以所提两模型的输出图形差别不是十分明显.但从其误差的比较,可以看到记忆效应的存在,因此无记忆 Saleh 函数模型能够较好的

(下转第 126 页)

变换,将结果转秩后进行列变换并输出的过程。

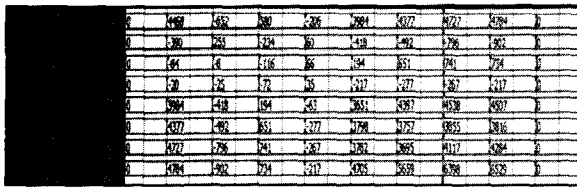


图5 仿真结果

用 Quartus 在 Stratix IV 系列器件 EP4SGX530 中进行了综合、布局布线及时序分析,得到结果如表 1 所示。

因为进行反量化时需要使用到 16×16 的乘法运算,如采用内置 18bit-DSP,会影响工作频率,对 DSP 资源也是一种浪费。这里全部采用逻辑单元,显然更加适合,这也在结果中得到印证。时序上该模块在慢工艺角中主时钟可以运行在 90MHz,对一个 4×4 宏块的平均处理过程不超过 25 个时钟周期。

6 结束语

文中通过对 IDCT 运算单元的复用,设计了一种结构精简的 IQIT 模块。与文献[2]中的 140 000 个 LE 相比,节省了超过 90% 的资源。并且主时钟可以运行在 90MHz,这样的结果在延时和吞吐率上能够

满足 1080 线全高清 H. 264 解码过程的要求,可以广泛的运用在低功耗和便携式设备中。

表 1 测试结果比较

采用电路	资源占用	工作频率
乘法器 IP	1393LE + 4 DSP18	70MHz
采用纯逻辑电路	1774LE	90MHz

参考文献:

- [1] International Telecommunication Union ITU-T Recommendation H. 264: Advanced video coding for generic audiovisual services[S]. Version 2007. 11.
- [2] 赵爽,王勇. H. 264 中的反变换反量化器的硬件设计[J]. 微电子学与计算机,2008,25(1):144-148.
- [3] 张晓燕,谢珺堂. H. 264 的整数 DCT 变换编码与量化过程[J]. 军民两用技术与产品,2005(4):40-43.
- [4] 蒋剑飞,郭炜. H. 264 中一种基于矩阵分解的变换算法及硬件实现[J]. 微电子学与计算机,2007,24(5):189-193.

作者简介:

韩斯晓 男,(1985-),硕士研究生.研究方向为数字电路的系统及 VLSI 设计与实现。

邵丙铤 男,教授,博士生导师.研究方向为微电子技术和半导体集成电路设计与分析。

(上接第 123 页)

模拟输出功率放大器的非线性特性,记忆 Saleh 函数模型能够较好的模拟输出功率放大器的非线性和记忆效应。从表 1 中可以看到,对于记忆 Saleh 函数模型和记忆多项式模型,在相同记忆深度的情况下,记忆 Saleh 函数模型的 NRMS 要好于三阶记忆多项式模型劣于五阶记忆多项式模型,因此 Saleh 函数模型更适用于弱非线性功率放大器。

4 结束语

精确模型功率放大器的行为 and 了解模型的适用情况是进行系统仿真时关键的内容,对实际设计具有重要的参考意义。文中在原 Saleh 模型的基础上,提出了无记忆 Saleh 函数模型和记忆 Saleh 函数模型,并对其两种模型进行了仿真。结果表明,所提出的模型结构简洁,系数数量少,复杂度相对较低,能够精确描述功率放大器的非线性和记忆效应,更适用于弱非线性系统电路中。

参考文献:

- [1] 罗志聪,林伟,孙奇燕,等. 一个功率可控型蓝牙

CMOS 功率放大器设计[J]. 微电子学与计算机,2009,26(6):202-205.

- [2] 丘春辉,陈向东,沈冰. 射频功率放大器前馈线性化技术研究[J]. 微电子学与计算机,2008,25(11):133-136.
- [3] Saleh A. Frequency-independent and frequency-dependent nonlinear models of TWT amplifiers[J]. IEEE Trans. Commun,1981(29):1715-1702.
- [4] Jose C Pedro, Stephen A Mass. A comparative overview of microwave and wireless power-amplifier behavioral modeling approaches [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2005, 53(4):1150-1163.
- [5] 南敬昌. Freescale device data-wireless RF product [M]. China, Freescale semiconductor, Inc. 2005:495-499.
- [6] 南敬昌. 宽带功率放大器非线性、行为模型与数字预失真系统研究 [D]. 北京:北京邮电大学,2007.

作者简介:

张玉梅 女,(1985-),硕士研究生.研究方向为射频功放模型与仿真技术。

南敬昌 男,(1971-),博士,教授.研究方向为射频电路与器件、多媒体信息编码、通信系统仿真等。