

宽带跟踪保持放大器失真的分析和计算

梁海浪^{1,2}, 何 进^{1,2}, 陈文新²

(1 北京大学 香港科技大学深圳研修院, 北京大学 深圳 SOC 重点实验室, 广东 深圳 518057;

2 北京大学 信息科学技术学院 微电子学研究院 纳太器件与电路研究室, 北京 100871)

摘 要: 基于高频肖特基二极管模型, 对宽带桥式跟踪保持放大器的失真进行了 Volterra 分析和计算. 分别导出了三阶谐波失真和互调失真表达式. 利用非线性电流方法采用计算机程序对弱非线性跟踪保持放大器失真进行计算, 计算结果显示其跟用 SpectreRF 仿真器进行仿真的结果具有很好的一致性, 结果也证明, 计算机程序在某些条件下, 总体计算效率得到了显著提高.

关键词: 跟踪保持放大器; 肖特基二极管; 谐波失真; Volterra 分析; 非线性电流方法

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)02-0027-04

Distortion Analysis and Calculation of Wide-band Track and Hold Amplifier

LIANG Hai-lang^{1,2}, HE Jin^{1,2}, CHEN Wen-xin²

(1 Peking University Shenzhen SOC Key Laboratory, PKU-HKUST
Shenzhen-Hong Kong Institution, Shenzhen 518057, China;

2 Tera-Scale Research Center, Institute of Microelectronics, School of Electronic
Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Volterra analysis and computer calculation of the wide-band diode bridge track and hold amplifier (THA) is proposed based on a high frequency Schottky diode model. Approximate expressions for the third-order harmonic distortion and the third-order intermodulation distortion are derived respectively. A computer program then calculates the distortion of weakly nonlinear THA based on the KCL and the nonlinear-current method. Simulations based on a commercially available 130 nm process technology are performed with the Spectre circuit simulator. Comparative SpectreRF simulated results for the diode bridge THA have shown good agreement with those of Volterra series analysis. It is also shown that results obtained by the program have a consistent match with those derived from Circuit simulator, whereas the overall computational efficiency has been improved in a special evaluation.

Key words: track and hold amplifier; schottky diode; harmonic distortion; Volterra analysis; nonlinear-current method

1 引言

超高速移动通讯系统对低成本、高带宽接收器提出了要求, 该接收器包括置于模数转换器前端的采用二极管桥式开关结构的跟踪保持放大器. 为了

获得大的输入带宽, 该放大器采用差分开环二极管桥式开关结构^[1]. 失真是限制放大器动态范围的主要因素之一, 因此为了提高放大器的性能, 必须要减小失真效应. 在文献[2]中基于简化的二极管模型对二极管桥式开关的失真进行了理论分析和仿真.

收稿日期: 2013-04-30; 修回日期: 2013-06-23

基金项目: 深圳科技基金国际合作项目(JSE201007200029A)

本文采用高频肖特基二极管模型对二极管桥式开关放大器的失真进行分析,提出一个依据 Volterra 序列分析的,用于计算该放大器弱非线性失真的计算机程序.

2 二极管桥型跟踪保持放大器

如文献[3]所述,考虑图 1 所示的二极管桥型跟踪保持放大器.该放大器包括用作输入输出开关的高速肖特基二极管桥(D_1-D_4),用于保持采样电压的保持电容 C_H ,用开关二极管桥的差分对(Q_1 和 Q_2),用于提升带宽的两个负载电感,两个负载电阻,一个引导缓冲器,一个输出缓冲器和尾电流.该二极管桥型跟踪保持放大器可用于宽带和高速应用场合.

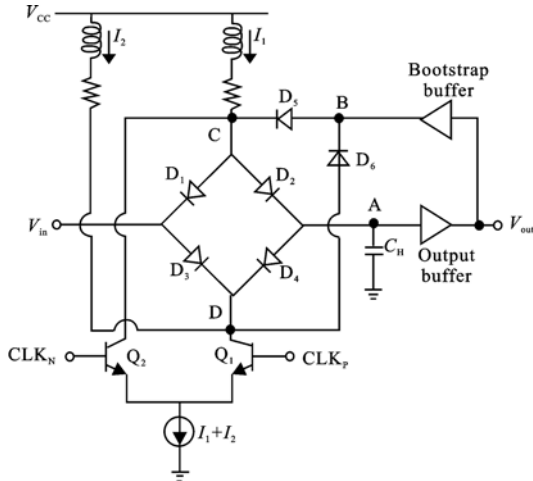


图 1 二极管桥型跟踪保持放大器

在跟踪模式,CLK_P置高,CLK_N置低,Q₁导通Q₂截止,电流 I_1 流过由 D_1 、 D_2 、 D_3 和 D_4 组成的二极管桥型电路.节点 C 的电压大于节点 D 的电压,结果输出电压 V_{out} 跟随输入电压 V_{in} . 电流 I_2 流过晶体管 Q_1 到地,因为二极管 D_5 和 D_6 反向偏置.

在保持模式,CLK_N置高,Q₁截止Q₂导通,前向偏置 D_5 和 D_6 ,反向偏置二极管桥.因此,电流 I_1 和 I_2 在节点 C 叠加并经由 Q_2 直接到地.输出电压 V_{out} 与输入电压 V_{in} 隔离,采样电压保持在电容 C_H 上.

3 模型的建立与失真分析

在保持模式,图 1 中的二极管桥型放大器截止.

$$H_3(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3) = \frac{\frac{I_d}{V_t} H_2(j\omega_1, j\omega_2) (H_1(j\omega_1) - 1) + \frac{I_d}{6V_t^3} (1 - 3H_1(j\omega_1) + 3H_1^2(j\omega_1) - H_1^3(j\omega_1))}{\frac{I_d}{V_t} - \frac{1}{r_d} - C_K j(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)} \quad (4)$$

式(2)显示最大工作频率受到保持电容的限制,

因此本文对二极管桥型放大器的分析集中在跟踪模式.在跟踪模式图 1 中的二极管桥型放大器的简化等效电路如图 2(a)所示.对于超高频应用,简化模型中的电阻 r_d ,结电容 C_j 和电荷扩散电容 C_d 用于表示图 2(a)中的 D_s ^[4],如图 2(b)所示.

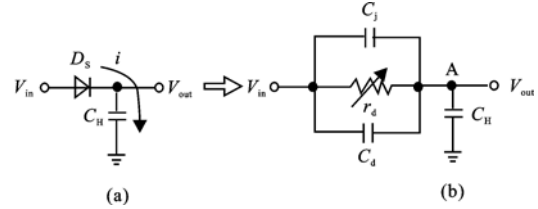


图 2 二极管桥型放大器的简化等效电路

图 2(b)简化二极管桥型跟踪保持放大器的等效模型可以按以下方法证明是合理的.当输入的 AC 信号足够小,纯电阻模型(r_d)可以表示二极管.在高频操作时,时变信号和电荷分离产生的效应应该考虑.这些效应存在于正向偏压二极管的耗尽区以及体中的 P 和 N 区.在耗尽区,输入 AC 信号将会产生时变电场,时变电场可以看作位移电流,其效应可以用图 2(b)的等效电路来建模.在该图中 C_j 是结电容, C_d 是电荷扩散电容.图 2(b)的模型精确预测肖特基二极管中的寄生电容,可以用于分析二极管桥型跟踪保持放大器弱非线性行为的失真.

如图 2 所示,对于小的失真,根据输入电压信号 $V_{in}(t)$,输出电压 $V_{out}(t)$ 可以用 Volterra 序列表示为以下的方程式(1).其中 ω_1 , ω_2 和 ω_3 是桥式放大器的输入频率.

$$V_{out}(t) = H_1(j\omega_1) \cdot V_{in}(t) + H_2(j\omega_1, j\omega_2) \cdot V_{in}^2(t) + H_3(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3) \cdot V_{in}^3(t) + \dots \quad (1)$$

一阶 Volterra 核 $H_1(j\omega_1)$ 如式(2)所示.

$$H_1(j\omega_1) = \frac{\frac{1}{r_d} + j\omega_1 C_K}{j\omega_1 C_H + \frac{1}{r_d} + j\omega_1 C_K} \quad (2)$$

二阶和三阶 Volterra 核 $H_2(j\omega_1, j\omega_2)$ 和 $H_3(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3)$ 分别如式(3)和式(4)所示.

$$H_2(j\omega_1, j\omega_2) = \frac{-\frac{I_d}{2V_t^2} (1 - H_1(j\omega_1))^2}{-\frac{I_d}{V_t} + \frac{1}{r_d} + C_K(j\omega_1 + j\omega_2)} \quad (3)$$

制,当放大器偏置电压确定后,保持电容值越小就可

获得越高的工作频率,如式(4)和(3)所示,当 $H_1(j\omega_1)$ 趋向于 1 时, $H_3(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3)$ 和 $H_2(j\omega_1, j\omega_2)$ 趋向于 0.

三阶谐波失真 HD_3 是三阶谐波的幅值与一次谐波的幅值的比率. 基于 Volterra 系数, HD_3 可由下面的式(5)表示^[5-6].

$$HD_3 = \frac{1}{4} \frac{|H_3(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3)|}{|H_1(j\omega_1)|} \cdot V_{in}^2 \quad (5)$$

三阶互调失真,亦即三阶核对一阶核的比值,可以表示为如下的式(6)^[5]:

$$IM_3 = \frac{3}{4} \frac{|H_3(\omega_1, \omega_2, \omega_3)|}{|H_1(\omega_1)|^3} \cdot V_{in}^2 \quad (6)$$

根据 Volterra 分析,选取合适的偏置电流和保持电容 C_H 即可获得适当的 IM_3 值.

4 计算程序

该程序采用 KCL 和非线性电流法进行计算,非线性电流法的详细描述请参见文献[7-8]. 在该方法中,一个简化压控电导的小信号 I/V 特性可以表示为^[8]

$$i = g_1 v + g_2 v^2 + g_3 v^3 + g_4 v^4 + g_5 v^5 + \dots \quad (7)$$

上式中一阶电压 $v(t)$ 是

$$v(t) = \frac{1}{2} \sum_{q=-Q}^Q v_{s,q} \exp(j\omega_q t) \quad (8)$$

二阶电流是^[8]

$$i_2(t) = g_2 v_1^2(t) + \frac{g_2}{4} \sum_{q_1=-Q}^Q \sum_{q_2=-Q}^Q v_{1,q_1} v_{1,q_2} \exp[j(\omega_{q_1} + \omega_{q_2})t] \quad (9)$$

该程序基于非线性电流方法和 KCL 采用易于移植 Python 语言编写. 程序采用线性电阻,二极管,电容,电感,可控源,传输线和非线性电阻,二极管,电容,电感,可控源作为基本单元来计算 Volterra 序列的失真. 程序的计算流程图如图 3 所示,其采用的基本算法参见文献[7-8].

程序启动后首先初始化环境变量,包括设定电阻,电容,二极管,电感和压控电流源等的初始值,同时用线性等效元件替换非线性元件. 然后程序开始用线性等效元件计算一阶电压. 输出的数据被保存. 接下来程序计算二阶和三阶电流和电压,高阶的电流和电压的计算要用到已经保存的低价数据. 正如流程图所示,每一阶相对应的电流和电压值求出来后,期望的相应响应即可从 Volterra 序列得出.

5 仿真结果

可用 SpectreRF 仿真器对该二极管桥型放大器

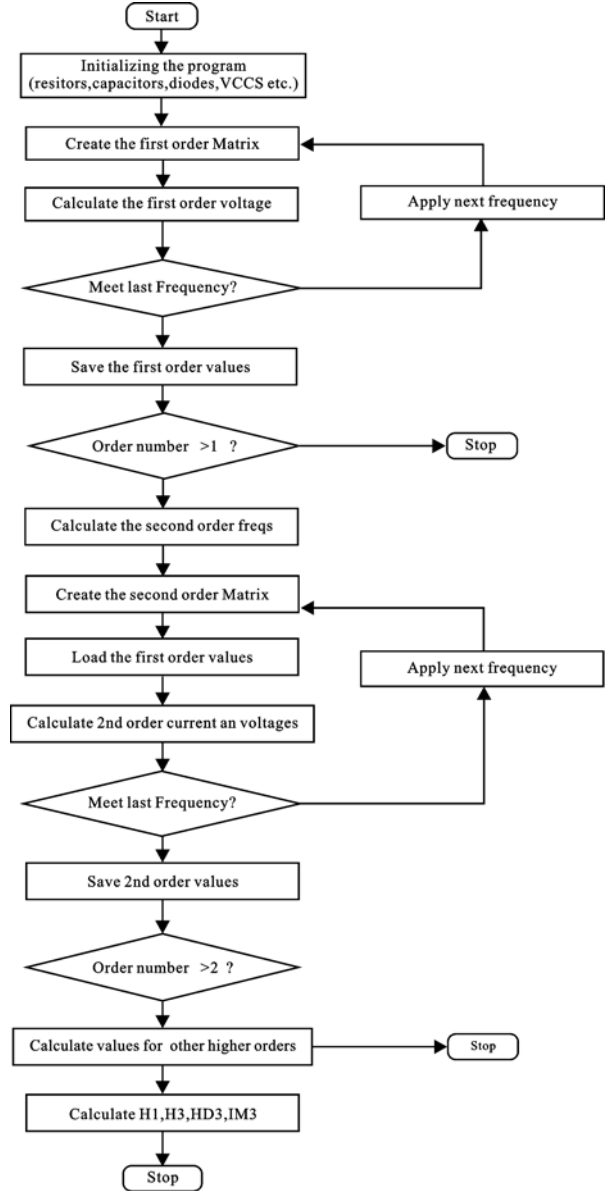


图3 计算失真的程序流程

进行小信号仿真分析就可以直接测出该放大器的失真特性.

在该仿真中,工艺采用商用的 130 nm CMOS 工艺,输入频率从 1 GHz 变化到 10 GHz,时钟源 CLK_P 设为 4 GHz, CLK_N 是 CLK_P 的互补信号. 用于仿真的电路如图 1 所示,是一个带有采样电容的差分二极管桥型开关放大器. 仿真所采用的相关参数为 $C_H=350$ fF 和 $I_d=5$ mA. 在 SpectreRF 仿真器中运行周期稳态分析(PSS),周期 AC 分析(PAC)和瞬态分析即可得到失真分析所需的数据. Volterra 分析和 SpectreRF 仿真的 IIP3 结果如图 4 所示. 由图可以看出,两者的结果很相似,因此该 IIP3 分析证实了本文 Volterra 理论分析和程序计算的正确性. Volterra 分析和 SpectreRF 仿真的 HD_3 结果

如图 5 所示. 同样两者的结果很相似, 从而证实了本文分析的正确性.

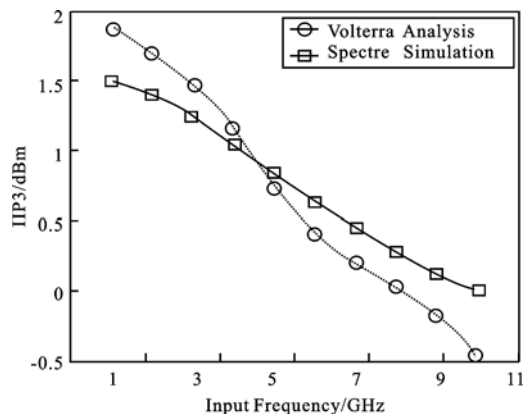


图 4 Spectre 仿真和程序计算 IIP3 值的比较

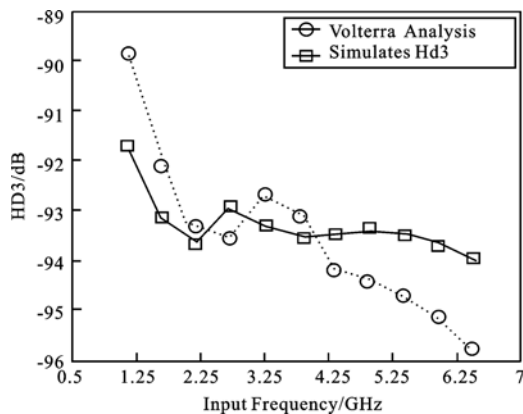


图 5 二极管桥型跟踪保持放大器 HD₃ 特性

在相同的硬件条件下, 程序计算的时间和 SpectreRF 仿真所需的时间如下面的表 1 所示. 显然在某些特定条件下, 程序计算的时间远小于 SpectreRF 仿真, 其执行效率比较高.

表 1 仿真时间对比

频率/GHz	1	3	5
程序计算/s	12.78	36.42	42.75
SpectreRF/s	37.87	107.93	177.68

6 结束语

采用简化高速二极管模型对二极管桥型放大器

进行了 Volterra 失真分析, 给出了放大器三阶谐波失真和三阶互调失真的表达式. 程序计算的结果和 SpectreRF 仿真的结果进行了比较, 其吻合度比较高, 程序计算在特定条件下效率比较高.

参考文献:

- [1] Jensen J, Larson L. A broadband 10 GHz track-and-hold in Si/SiGe HBT technology[C]// Proceedings of the IEEE 2000 Custom Integrated Circuits Conference. Orlando, USA, 2000:245-248.
- [2] Jensen J C. Ultra-high speed data converter building blocks in Si/SiGe HBT process[D]. San Diego, University of California, 2005.
- [3] Liang H, Evans R J, Skafidas E. Distortion analysis of ultra wide-band diode bridge track and hold amplifier [C]// MWSCAS 2010-2010 IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems, Seattle, Washington, 2010:721-724.
- [4] Sedra AS, Smith K C. Microelectronic circuits[M]. 6th ed. New York: Oxford University, 2009.
- [5] Jensen J C. Ultra-high speed data converter building blocks in Si/SiGe HBT process[D]. San Diego: University of California, 2005.
- [6] Minasian R. Intermodulation distortion analysis of MESFET amplifiers using the volterra series representation[J]. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 1980, 28(1):1-8.
- [7] Weiner D D, Spina J E. Sinusoidal analysis and modeling of weakly nonlinear circuits[M]. New York, Van Nostrand, 1980.
- [8] Maas S. A general-purpose computer program for the volterra-series analysis of nonlinear microwave circuits [J]. Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International, 1988(1):311-314.

作者简介:

梁海浪 男, 博士, 副研究员. 研究方向为毫米波集成电路设计.

何进 男, 博士, 教授. 研究方向为毫米波器件建模技术.