

大信号射频二极管的时域模拟初步分析

古 健, 刘长军, 闫丽萍, 黄卡玛, 张志刚

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘 要: 从全时域分析的角度出发, 以非线性射频二极管为例, 给出了进行射频/微波非线性器件时域模拟的基本方法。在时域模拟后, 通过快速傅立叶变换(FFT)得到电路模型的频域信息, 并对相关电路参数进行了分析和讨论。

关键词: 电子技术; 时域分析; 数值模拟; 射频/微波电路; 非线性

中图分类号: TN911.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2892(2004)04-0310-04

1 引言

混频器在现代通信系统和现代雷达系统中具有广泛的应用, 它的两个重要组成部分是信号合成单元和信号检测单元。

信号检测单元通常采用非线性二极管等非线性器件, 由它们的非线性效应可以得到新的频率分量。目前对于微波非线性器件的模拟分析方法多采用谐波平衡法、打靶法、频域延拓交调平衡法、谐波平衡一同伦连续算法、Brute-force 等频域分析方法^[1-4]。本文从时域分析的角度对微波非线性二极管进行了模拟, 并由傅立叶变换得到频域信息, 对频域信息和在模拟过程中可能对其造成影响的各因素进行了分析。

2 电路模型与分析

2.1 基本模型

图1所示为一射频非线性二极管模型^[5]:

这一模型的 I - V 特性满足如下方程:

$$I_D = I_s(e^{V_A/(nV_T)} - 1) \quad (1)$$

其中 I_s 为反向饱和电流, V_T 为热电势, 发射系数 n 被选作一附加参量, 目的是使模型与实际测量更趋近一致, 在大多数应用中趋近于 1.0。

扩散电容 C_d 和结电容 C_j 组合成更具一般形式的单一电容 C 。对于结电容有如下关系:

$$C_j = \frac{dQ_j}{dV_A} = \frac{C_{j0}}{1 - \frac{V_A}{V_{diff}}} \quad (2)$$

其中 V_{diff} 为势垒电压, m 是二极管结系数, 对于渐变结二极管 m 取值 0.5。实际中一旦外电压 V_A 超过阈电压 V_m 后, 结电压几乎与外电压呈线性关系, 阈电压通常为内建电势的一半, 即 $V_m = 0.5V_{diff}$ 。所以在整个外加电压范围内, 描述结电容的近似公式如下:

$$C_j = \begin{cases} \frac{C_{j0}}{(1 - V_A/V_{diff})^m}, & V_A \leq V_m \\ \frac{C_{j0}}{(1 - V_A/V_{diff})^m} (1 + m \frac{V_A - V_m}{V_{diff} - V_m}), & V_A \geq V_m \end{cases} \quad (3)$$

扩散电容与 V_A 有关, 并满足下式:

$$C_d = \frac{dQ_d}{dV_A} = \frac{I_s \tau_T}{nV_T} e^{\frac{V_A}{nV_T}} \quad (4)$$

其中 τ_T 为渡越时间。

一般而言, PN 结二极管的总电容 C 可划分为三个区域:

- 1) $V_A < 0$, 只有耗尽层电容最重要: $C = C_j$
- 2) $0 < V_A < V_{diff}$, 耗尽层和扩散电容相结合: $C = C_j + C_d$

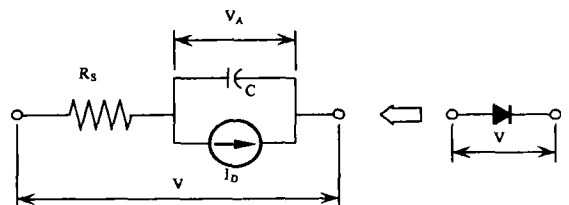


图1 大信号射频二极管模型

收稿日期: 2004-04-27; 修回日期: 2004-11-16

作者简介: 古 健 (1979-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线电物理。

3) $V_A > V_{diff}$, 只有耗尽层电容最重要: $C = C_d$

实际二极管中的电荷注入与提取由电荷中性区内的电压降所形成的电场来完成。这个电压降可由一串联电阻 R_S 模拟, 因此在图1中的总电压由以下两部分贡献组成:

$$V = R_S I_D + nV_T \ln(1 + I_D/I_S) \quad (5)$$

另外模型受到温度变化的影响, 主要表现为对热电压 $V_T = kT/q$ 以及反向饱和电流 I_S 的影响:

$$I_S(T) = I_S(T_0) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{p_I/n} \exp\left[-\frac{W_g(T)}{V_T} \left(1 - \frac{T}{T_0}\right)\right] \quad (6)$$

其中参考温度 T_0 一般取值为 $T_0 = 300\text{K}$, 对 PN 结二极管反向饱和电流温度系数 p_I 取 3。

非线性 PN 结二极管模型的参量取值如表1所示:

表1 非线性 PN 结二极管模型参量及典型值

符号	说明	典型值
I_S	饱和电流	$1\text{fA} \sim 10\text{uA}$
n	发射系数	1
τ_T	渡越时间	$5\text{ps} \sim 500\text{us}$
R_S	欧姆电阻	$0.1\Omega \sim 20\Omega$
V_{diff}	势垒电压	$0.6\text{V} \sim 0.8\text{V}$
C_{j0}	零偏置结电容	$5\text{pF} \sim 50\text{pF}$
W_g	带隙能	1.11eV

2.2 模拟电路分析

模拟电路如图2所示。

由基尔霍夫电压定律可以得到:

$$V_A = V_1 + V_2 - R_G I - R_S I - R_L I \quad (7)$$

由基尔霍夫电流定律可以得到: $I - I_D - I_C = 0$,

又 $I_C = C(dV_A/dt)$, 联立(1)式可得到电流关系式如下:

$$I = I_S(e^{V_A/V_T} - 1) + C \frac{dV_A}{dt} \quad (8)$$

式中结电容 C_j 和扩散电容 C_d 如前分析所述。

将(7)式中的微分用差分形式替代, 用上标表示第 n 个时间步 $t_n = n\Delta t$:

$$\frac{dV_A}{dt} = \frac{V_A^{n+1} - V_A^n}{\Delta t}$$

并令 $dt = \Delta t$, $I = I^n$, $V = V^n$ 对电流电压作离散化, 则电流关系式可以表示为显式的差分格式:

$$I^n = I_S \left(\exp^{V^n/V_T} - 1 \right) + C \frac{V^{n+1} - V^n}{\Delta t}$$

$$\text{变换得到: } V^{n+1} = \left[I^n - I_S \left(\exp^{V^n/V_T} - 1 \right) \right] \Delta t / C + V^n \quad (9)$$

$$\text{由(7)式可以得到: } I^{n+1} = \frac{V_1^{n+1} + V_2^{n+1} - V^{n+1}}{R_G + R_S + R_L} \quad (10)$$

(9), (10)式即是用差分形式表示的离散化电压电流联立方程组。通过求解这一联立方程组可由上一时间步的电流电压求出当前的电流电压值。

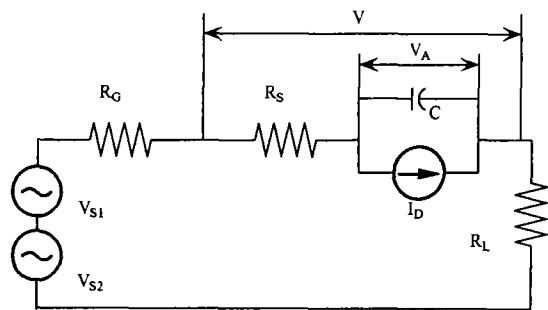


图2 模拟电路

3 模拟数据分析

图2所示模拟电路中的一些具体参数取值为:

$\omega_1 = 1 \times 10^8 \text{Hz}$, $\omega_2 = 9 \times 10^7 \text{Hz}$, $V_1 = 2 \sin(2\pi\omega_1 t)$, $V_2 = 2 \sin(2\pi\omega_2 t)$, $R_G = 1\Omega$, $R_L = 10\Omega$, $R_S = 1\Omega$, $C_{j0} = 5\text{pF}$, $I_S = 10^{-12} \text{A}$, $\tau_T = 100\text{ps}$, $V_{diff} = 0.6\text{V}$ 。

用 Fortran 编程模拟, 得到电路模型的输入输出电流电压时域特性波形, 以及经过 FFT 变换后的频域图形, 分别如图3、图4、和图5所示。

图3(a)为输入电压波形图。由图4(a)可以看到非线性二极管正向导通反向截止的特性, 图5(a)反映出非线性二极管截止电压的特性。

在图3(b)中可以看到与两个输入电压信号对应的主频率点。在图4(b)、图5(b)中可看到两主频产生的差频、和频、镜频、以及其他多次混频产生的频率, 这些正是非线性二极管产生新的频率分量。从频谱分析上可以看出时域计算分析的方法是可靠的。

两输入信号源的频率 ω_1 , ω_2 变大将导致图4(a)中的反向电流更加明显, 反映出非线性二极管受频率影响的高频特性, C_{j0} 等参数的变化也对图4(a)中的反向电流有一定的影响。图3(b)、图4(b)、图5(b)对应的频域波形经过反傅立叶变换可以很好地还原出时域信号。

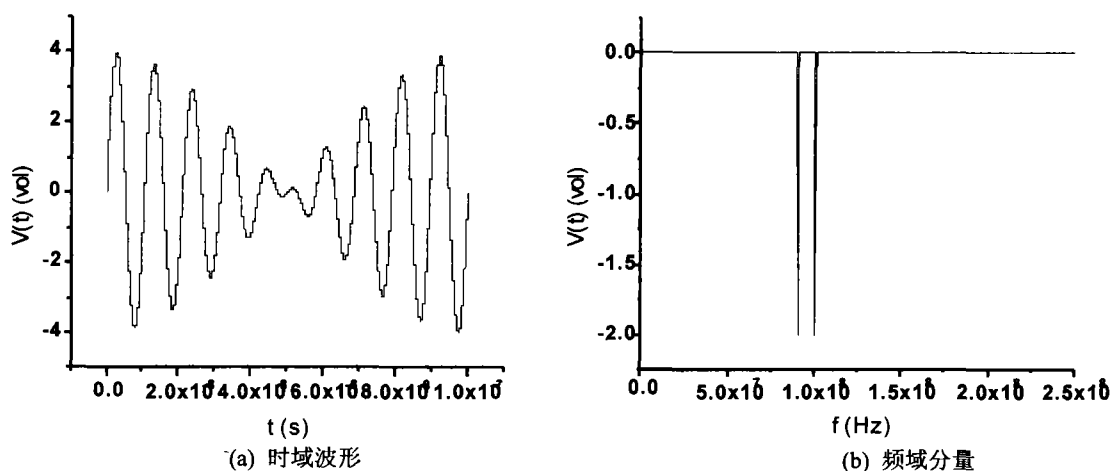


图3 输入电压的时域波形和频域分量

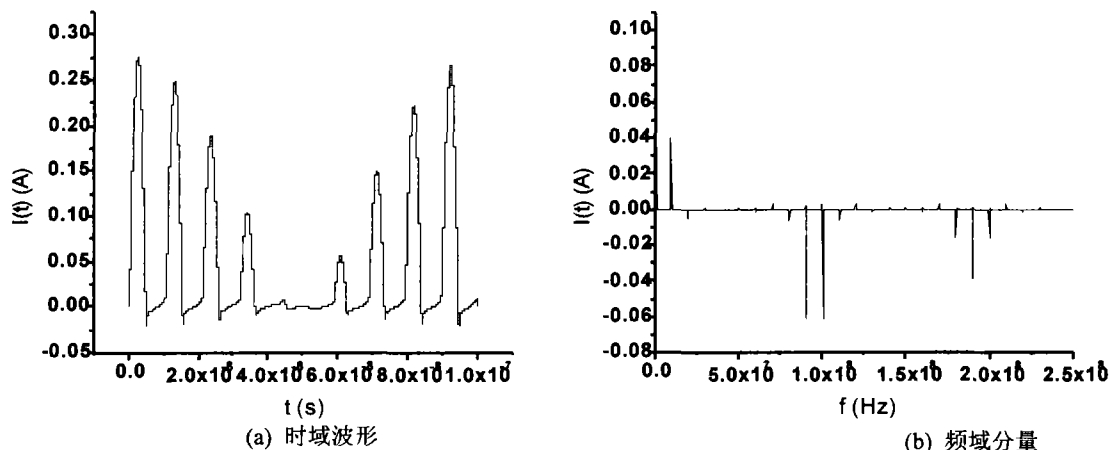


图4 输出电流的时域波形和频域分量

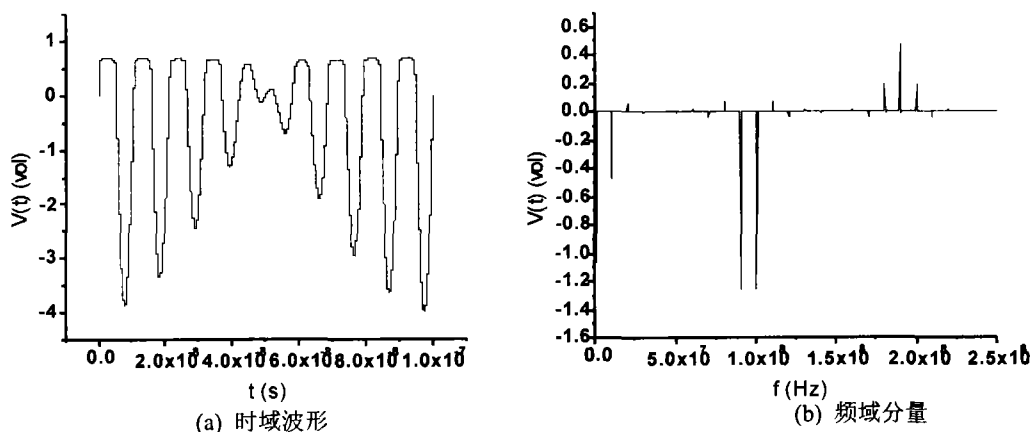


图5 输出电压的时域波形和频域分量

图3、4、5中时域波形对应的采样点个数是110000, 采样周期是10个。频域分量对应的采样点个数是110000, 采样周期是100个。

4 讨论

本文从基尔霍夫电流电压定律出发, 导出所模拟电路的电流电压关系式, 并用差分法从时域的角度对非线性

性二极管进行了模拟仿真。本方法可用于各微波非线性器件的模拟分析,由于分析所得结果为时域波形,通过给定信号脉冲的激励得到时域响应,对响应进行时域-频域转换可得到极宽频带范围的信息,而无需在为数众多的频域取样点上分别进行频域分析,并且本方法无需较多的数学预处理,相对简单易用。因此,本文方法可应用到射频电路模拟和设计的更多领域^[6,7]。

本方法不足之处是采用显式差分法要求时间步长取值很小,以满足稳定条件及足够的精度,并且计算时间较长,在复杂电路中表现尤为明显。如果采用隐式差分法模拟分析,求解过程较为复杂。在今后工作中将通过这种时域分析方法对复杂射频/微波器件和电路进行模拟,并且引入改进的隐式时域差分格式,提高计算的稳定性和计算效率。

参考文献:

- [1] Kenneth S Kundert. Introduction to RF Simulation and Its Application[J]. IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUIT, 1999, 34(9):1298-1319.
- [2] Kartikeya Mayaram, David C Lee, Shahriar Moinian, et al. Computer-Aided Circuit Analysis Tools for RFIC Simulation: Algorithms, Features, and Limitations[J]. IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS—II: ANALOG AND DIGITAL SIGNAL PROCESSING, 2000, 47(4):274-286.
- [3] 汪连栋,赫崇骏. 多频激励微波非线性电路分析及其同伦连续算法[J].国防科技大学学报,1995,17(1):22-28.
- [4] R Telichevsky, K Kundert, I Ekdahl, et al. Fast simulation algorithms for RF circuits[A]. IEEE 1996 CUSTOM INTEGRATED CIRCUITS CONFERENCE[C].437-444.San Jose,California, United States.1996.437-444.
- [5] Reinhold Ludwig,Pavel Bretchko.RF Circuit Design Theory and Applications[M].Science Press and Pearson Education North,2000.
- [6] Paolo Miliozzi, Ken Kundert, Koen Lampaert, et al. A design system for RFIC:Challenges and solutions. Proceeding of the IEEE, 2000, 88(10): 1613-1632.
- [7] Alin Grama, Florin Hurgoi, Gabriel Chindris, et al. Design principles for modeling and simulations of microwave circuits[A].24th International Spring Seminar on Electronics Technology[C]. Calimanesti-Caciulata, Romania. MAY 5-9,2001.

Large Signal Time Domain Simulation and Primary Analysis of RF Diode

GU Jian, LIU Chang-jun, YAN Li-ping, HUANG Ka-ma, ZHANG Zhi-gang

(School of Electronics & Information engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Time domain simulations and analysis on RF nonlinear devices is mostly based on frequency domain methods, such as harmonic balance, shooting method and so on. Time domain method to simulate and analyze large signals on RF/MW nonlinear devices is presented in this paper. A nonlinear RF diode is simulated, and the frequency domain results are achieved by Fast Fourier Transform (FFT).

Key words: electronic technology; time domain analysis; numerical simulation; RF/MW circuit; nonlinear

(上接第 258 页)

参考文献:

- [1] 周东华,叶银忠.现代故障诊断与容错控制[M].北京:清华大学出版社,2000.
- [2] 方开泰.实用多元统计分析[M].上海:华东师范大学出版社,1986.
- [3] 吴国富,安万福,刘景海.实用数据分析方法[M].北京:光明日报出版社,1992.10.
- [4] WANG Hai-qing. Industry Process monitoring: An Approach Based on Wavelets and Statistics[D].Hangzhou:Department of Control Science and Engineering,Zhejiang University,2000.

Faults Distinguish Technology of Multivariate Statistical Process Based on Principle Component Analysis

YANG Li

(Institute of Electronic Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: In this paper, the Principle Component Analysis theory is introduced. The mechanism and strategy of fault diagnosis based on this theory is presented. A simulation instance indicates a fault diagnosis model constructed with this approach can abstract efficiently the main variable information of original data set independent of process mechanism, and can respond to abnormal change of the process. It can find the cause of a fault and locate the fault exactly.

Key words: mathematical statistics; fault diagnosis; multivariate statistical process; principal component analysis