

Cascode 结构微波混沌振荡器的设计<sup>\*</sup>

唐珂 谢源 曾明杰

(上海电机学院电气学院 上海 201306)

**摘要:**提出了一种应用于宽带混沌信号发生器的 Cascode 结构微波混沌振荡器。利用微波晶体管 BFG520 对混沌振荡电路进行了设计和验证,通过在振荡电路与输出端口之间增加射极跟随器实现输出隔离并降低负载牵引的影响。基于晶体管 Gummel-Poon 模型对电路进行了 PSpice 仿真,结果证明新结构在很宽的参数变化范围内具有混沌特性。数值计算和实验测试结果表明:相比经典 Colpitts 混沌振荡器,新结构的李亚谱诺夫指数的维度提升了 20%,达到 2.5;测试频谱的基本频率提升了 33%,达到 1.41 GHz。

**关键词:**混沌;振荡器;Cascode 结构;李亚谱诺夫指数;频谱

**中图分类号:** TN 431.1    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.1025

## Design of Cascode microwave chaotic oscillator

Tang Ke Xie Yuan Zeng Mingjie

(School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** A microwave chaotic Cascode-oscillator which can be used as wideband chaotic signal generator is presented. The chaotic oscillation circuit is designed using microwave transistor BFG520. A source follower is added between the oscillation circuit and output port for isolation and to reduce the load influence. The PSpice simulation results based on Gummel-Poon model of BFG520 proves that the novel circuit has a chaotic performance in a large range of parametric variation. Numerical and experimental results show that: compared to traditional chaotic oscillator, the Lyapunov dimension of the novel circuit is improved 20% and up to 2.5, the fundamental frequency of the measured spectra is improved 33% and up to 1.41 GHz.

**Keywords:** chaotic; oscillator; Cascode structure; Lyapunov exponent; spectrum

## 1 引言

混沌信号具有宽频谱特性,其在扩频和保密通信等方面具有广泛的潜在应用前景<sup>[1-5]</sup>。作为混沌信号发生器核心部件的混沌振荡器受到了越来越多的关注,近年来研究人员对工作在微波频带内的宽带混沌振荡器做了大量研究<sup>[6-9]</sup>。分析表明经典单晶体管 Colpitts 混沌振荡器产生的混沌振荡信号的基本频率  $f^*$  约为所使用晶体管截止频率  $f_T$  的十分之一,即  $f^* \approx 0.1f_T$ <sup>[7]</sup>。比如,截止频率  $f_T = 9$  GHz 的 BFG520 晶体管所能产生的混沌信号的最高基本频率  $f^* \approx 900$  MHz;当  $f^* > 1$  GHz 时,晶体管在基频、低于基频和高于基频的宽频范围内仍能产生混沌信号,但输出信号功率衰减 20~30 dB 以上。PSpice 仿真及实验

表明由于寄生效应如导线寄生电感、电阻和晶体管寄生电容的影响, $f^*$  最高只能达到 1.06 GHz。实际上,在基本频率  $f^* > 500$  MHz 时,单晶体管 Colpitts 振荡器很难产生可靠的和可复制的混沌信号。

为了克服经典单晶体管混沌振荡器的上述缺点,文献[10]介绍了一种变形的两级混沌电路。最高仿真基本频率可以达到原来的 3 倍,即  $f^* \approx 0.3f_T$ ,利用截止频率为 300 MHz 的 2N3904 晶体管进行了甚高频段(VHF:30~300 MHz)的仿真实验,实现  $f^*$  达到 90 MHz,但基于 BFG520 晶体管的实验结果未能达到 1 GHz 以上的预期目标。

本文提出一种 Cascode 结构微波混沌振荡器,PSpice 仿真结果和李雅普诺夫指数计算结果表明:新结构在很宽

收稿日期:2016-03

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金(61374136)、上海市自然科学基金(12ZR1411800)项目资助

的参数变化范围内具有混沌特性,标称混沌特性的李亚谱诺夫指数的维度提升了 20% 以上。基于微波晶体管 BFG520 的实验验证结果证明新结构电路能够产生基频达到 1.41 GHz 的稳定混沌信号。

## 2 电路设计

如图 1 所示为 Cascode 结构微波混沌振荡器仿真和实验测试所使用的完整电路。其中 Q1~Q2 晶体管组成 Cascode 结构混沌振荡器, Q3 晶体管作为射极跟随器起到隔离输出端口和主振荡器的作用。振荡环路由耗能电阻  $R$ 、电感  $L$  和 3 个串联的电容  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  组成。 $C_4$  为输出耦合电容,滤波电容  $C_0$  起到射频接地和提升高频滤波效果的作用。 $R_e$  为射极偏置电阻,通过改变射极偏置电压  $V_2$  来调节射极偏置电流  $I_0$ 。

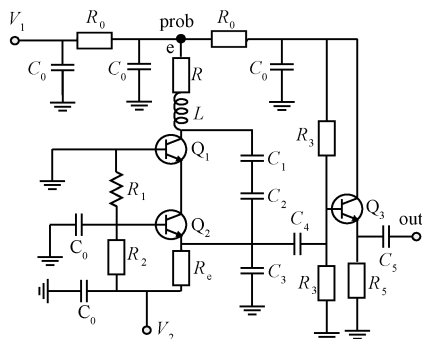


图 1 Cascode 结构微波混沌振荡器

仿真与测试所使用的非振荡环路元器件参数一致,具体如下: $R_0=100\ \Omega$ ,  $R_1=510\ \Omega$ ,  $R_2=3\ \text{k}\Omega$ ,  $R_3=5.1\ \text{k}\Omega$ ,  $R_4=3\ \text{k}\Omega$ ,  $R_5=200\ \Omega$ ,  $R_e=1.5\ \text{k}\Omega$ ,  $C_0=47\ \text{nF}$ ,  $C_4=1\ \text{pF}$ ,  $C_5=270\ \text{pF}$ 。振荡环路元器件  $R$ 、 $L$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_3$  依赖于所设定的基本振荡频率  $f^*$ , 具体参数值在仿真和实验部分分别给出。

实际电路中的寄生电感值由 3 部分组成:引线的寄生电感  $L_{\text{ext}}$ , 耗能电阻的寄生电感  $L_R$  和滤波电容的寄生电感  $L_{C_0}$ 。因此,总电感  $L=L_{\text{ext}}+L_R+L_{C_0}$ , 根据经验值,本文中电路的寄生电感值近似为 2 nH。电路中晶体管 Q1、Q2 和 Q3 采用引言中提到的微波晶体管 BFG520。通过调节电源电压  $V_1$  和  $V_2$  来获得混沌振荡频谱。

## 3 电路仿真

利用仿真器 PSpice 软件对图 1 所示的电路进行仿真,仿真中使用的晶体管模型如 Gummel-Poon 模型。振荡环路元器件参数为  $R=47\ \Omega$ ,  $L=16\ \text{nH}$ ,  $C_1=C_2=C_3=2.4\ \text{pF}$ 。偏置电压为  $V_1=10\ \text{V}$ ,  $V_2=24\ \text{V}$ 。图 2 所示为仿真得到的混沌吸引子图,图中纵坐标为电感电流  $I_L$ , 横

坐标为集电极电压  $V_{Q1}$ 。由图 2 可以看出吸引子图布满整个相空间,振荡器在很宽的控制参数范围内具有混沌特性。

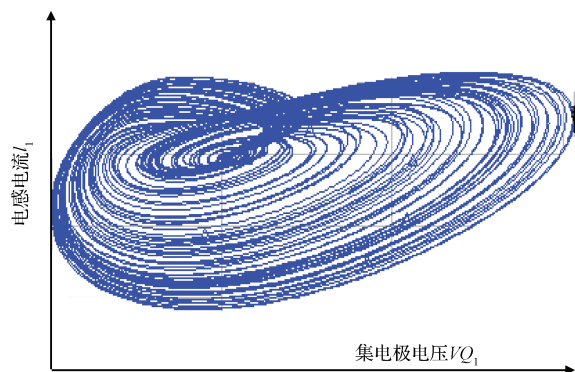


图 2 仿真混沌吸引子图

## 4 李亚谱诺夫指数计算

李亚谱诺夫指数是标示系统能否进入混沌状态的重要参数,其维度越高,电路系统高频振荡越稳定,下面对本文提出的混沌电路结构的李亚谱诺夫指数进行推导和计算。

如图 1 所示电路的动力学特性可以由下面的微分方程表示:

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} = I_L - I_{E1}(r, V_{C2}, V_{C3}) \\ L \frac{dI_L}{dt} = V_0 - V_{C1} - V_{C2} - V_{C3} - RI_L \\ C_3 \frac{dV_{C3}}{dt} = I_L - I_{EQ2}(r, V_{C2}) \\ C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} = I_L - I_0 \end{cases} \quad (1)$$

设  $V_{C3}=0$ , 并代入上式中,第 3 项  $V_{C3}$  可以忽略,则上式与经典 Colpitts 振荡器的状态方程一样。为了简化,设振荡回路中两个共基极结构晶体管的前向电流增益  $\alpha=1$ , 即忽略基极电流。引入下面的无量纲状态参数:

$$\begin{cases} x = \frac{V_{C1}}{\rho I_0} \\ y = \frac{I_L}{I_0} \\ z = \frac{V_{C2}}{\rho I_0} \\ v = \frac{V_{C3}}{\rho I_0} \\ t = \frac{t}{\tau} \end{cases} \quad (2)$$

令上式中的参数

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{\frac{L}{C_1}} \\ \tau = \sqrt{LC_1} \\ \epsilon_2 = \frac{C_2}{C_1} \\ \epsilon_3 = \frac{C_3}{C_1} \\ a = \frac{\rho}{r} \\ b = \frac{R}{\rho} \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)和(3)代入式(1)的状态方程,可以得到新的状态方程为:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y - F_1(a, z, v) \\ \frac{dy}{dt} = -x - z - v - by \\ \epsilon_3 \frac{dv}{dt} = y - F_2(a, z) \\ \epsilon_2 \frac{dz}{dt} = y - 1 \end{cases} \quad (4)$$

上式中忽略了  $V_0/\rho I_0$ , 因为不影响系统的动力学特性, 引入的非线性函数  $F_1$  和  $F_2$  分别描述两个晶体管基极-射极之间的电流电压特性。函数  $F_1$  和  $F_2$  可以由下式给出:

$$F_1(a, z, v) = \begin{cases} 1 - a(z + v), & a(z + v) < 1 \\ 0, & a(z + v) \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$F_2(a, z) = \begin{cases} 1 - az, & az < 1 \\ 0, & az \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

式(5)和(6)中  $a$  的值由基极-射极小信号等效微分电阻  $r$  决定, 为了简化数学模型, 设定  $r$  为常数。实验中可以通过调节射极直流电流  $I_0$  来控制  $r$  的值。

为了定量分析电路非线性特性, 本文利用 MATLAB 中的李亚谱诺夫指数工具(LET)来仿真电路李亚谱诺夫指数。LET 仿真需要相应状态方程的雅克比矩阵, 式(4)包含两个分段线性函数  $F_1$  和  $F_2$ 。雅克比矩阵在每段具有 4 个不同的形式。设定参数  $a=10$ ,  $b=0.4$ ,  $\epsilon_2 = \epsilon_3 = 3$ , 通过 LET 仿真器可以得出以下李亚谱诺夫指数(LE):

$$\begin{cases} \lambda_1 = 0.072 \\ \lambda_2 = 0 \\ \lambda_3 = -0.152 \\ \lambda_4 = -0.322 \end{cases} \quad (7)$$

上式结果证明: 式(4)描述了一个四维系统, 它只有一个正的 LE, 即  $\lambda_1 = 0.072 > 0$ , 相比具有两个正 LE 参数的经典 Colpitts 混沌振荡器, 本文 Cascode 结构混沌振荡器表现出更高的混沌行为。应用 Kaplan-Yorke 猜想:

$$\begin{cases} d_L = j + \frac{\sum_{i=1}^j \lambda_i}{|\lambda_{j+1}|} \\ \sum_{i=1}^j \lambda_i > 0 \\ \sum_{i=j+1}^4 \lambda_i < 0 \end{cases} \quad (8)$$

根据上式估算李亚谱诺夫指数的维度  $d_L \approx 2.5$ , 在设定相似的参数值的条件下, 这比经典单级 Colpitts 振荡器的  $d_L \approx 2.08$  要大 20% 以上。

## 5 实验结果

本文对新结构混沌电路进行了实验验证, 晶体管型号与仿真所使用的 BFG520 晶体管一致, 振荡环路元器件参数为  $R=17 \Omega$ ,  $L=4 \text{ nH}$ ,  $C_1=C_2=C_3=1 \text{ pF}$ ,  $V_1=6.3 \text{ V}$ ,  $V_2=27 \text{ V}$ 。如图 3 所示为电路输出频谱图, 混沌振荡的基本频率  $f^*$  为 1.41 GHz, 在 540 MHz~2.8 GHz 频率范围内能产生连续混沌信号频谱。相比现有技术的基本频率  $f^* = 1.06 \text{ GHz}$ , 新结构混沌振荡基本频率  $f^*$  提升了 33%。

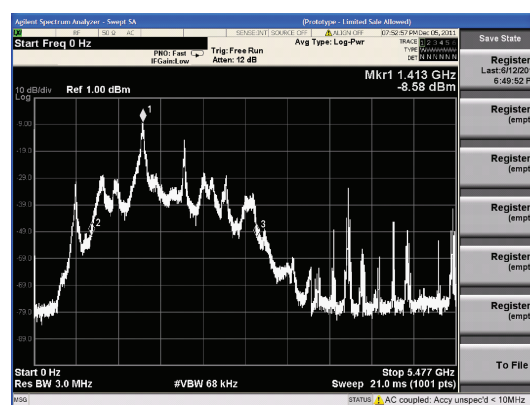


图 3 频谱测试

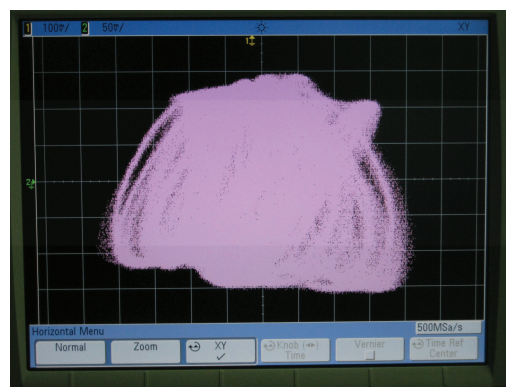


图 4 测试混沌吸引子图, 纵坐标为测试点 probe 电压, 横坐标为输出 out 端电压

将图1电路中测试点 probe 电压作为纵坐标,输出 out 端电压作为横坐标加载到示波器的两个输入通道进行垂直叠加,可以得到如图4所示的测试混沌吸引子图。由图4可以看出,吸引子图布满整个相空间,电路处于完全混沌状态,其图形状态与图2的仿真吸引子图略有不同,这是由试验中使用的晶体管的性能及元器件的寄生参数与仿真模型之间的差别引起的,属于正常现象。

## 6 结 论

本文提出 Cascode 结构微波混沌振荡器,对电路进行了详细的描述和仿真测试验证。PSPICE 仿真得到的混沌吸引子图证明新结构在很宽的参数变化范围内具有混沌特性,李雅普诺夫指数计算结果表明标称混沌特性的李亚普诺夫指数的维度达到了2.5。基于BFG520晶体管的实验频谱图和吸引子图表明新结构可以产生基频达到1.41 GHz的稳定混沌信号,相比经典单级混沌振荡器,具有更好的频谱特性。

## 参 考 文 献

- [1] 行鸿彦,冒海微,徐伟,等. 基于压缩感知的脉冲同步的混沌保密通信系统[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1510-1517.
- [2] 胡瑜,陈涛. 基于C-C算法的混沌吸引子的相空间重构技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(5): 425-430.
- [3] 吴刚,蔡理. 基于共振隧穿二极管的蔡氏电路及其应用[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 454-458.
- [4] 崔力,欧青立,徐兰霞. 分数阶 Lorenz 超混沌系统及其电路仿真[J]. 电子测量技术, 2010, 33(5): 13-16.
- [5] 徐兰霞,欧青立,崔力. 混沌超宽带通信调制方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(1): 33-35.
- [6] STEFANIDIS V, TSAKIRIDIS O, ZERVAS E. Design of a microwave chaotic oscillator using symmetric active load [J]. Latest Trends on Circuit, 2010: 80-83.
- [7] CHEN W L, HU S W, LIU X Z, et al. A non common-node chaotic Colpitts oscillator with negative resistance enhancement [J]. IEICE Electronics Express, 2014, 11(22): 1-6.
- [8] CHEN W L, LIU X Z, WU H D, et al. A wideband chaotic Colpitts oscillator with negative resistance enhancement for UWB applications [J]. Microwave Journal, 2015, 58(9): 88-98.
- [9] 史治国,皇甫江涛,冉立新. 微波 Colpitts 混沌电路实验研究[J]. 电路与系统学报, 2007(1): 119-123.
- [10] LINDBERG E, TAMASŠEVICIUS A, MYKO-LAITIS G, et al. Towards threshold frequency in chaotic Colpitts oscillator[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2007, 17(10): 3449-3453.

## 作 者 简 介

唐珂,1991年出生,男,汉,籍贯江苏苏州,硕士研究生,就读于上海电机学院电气学院,主要研究方向为风力发电状态监测与故障诊断。  
E-mail:fengxfxsof@sina.com