

文章编号: 2095-4980(2019)03-0531-05

Cascode 混沌电路负阻模型与电路设计

陈文兰, 郑林华, 杨星华

(中国电子科技集团公司 第三十八研究所, 安徽 合肥 230088)

摘要: 针对 Cascode 结构振荡器进行研究, 通过理论推导和分析, 给出两级负阻提升的通用模型, 该模型可以被广泛应用于混沌电路设计中, 实际电路设计时可以用合适的负阻电路单元替代两级结构中的下级部分, 实现电路负阻的提升。仿真设计结果表明, 基于该模型设计的混沌电路的混沌振荡基频 f_0 为 4.2 GHz, f_0/f_T 值达到 0.46, 较经典单级电路有较大提升。

关键词: Cascode 结构; 混沌电路; 负阻模型; 振荡频率

中图分类号: TN402

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201903.0531

Negative resistance model and circuit design of Cascode chaotic oscillator

CHEN Wenlan, ZHENG Linhua, YANG Xinghua

(No.38 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Hefei Anhui 230088, China)

Abstract: A two-stage negative resistance enhancement model is presented based on research, theoretical derivation and analysis of Cascode oscillator. This general negative resistance model can be broadly used in chaotic circuit design. In practical circuit design, the negative resistance can be enhanced by replacing the lower-stage with an appropriate negative resistance unit. Simulation results show that the chaotic fundamental frequency f_0 of the novel circuit is 4.2 GHz and the f_0/f_T value is up to 0.46, which is much higher than that of classical single-stage circuit.

Keywords: Cascode; chaotic circuit; negative resistance model; oscillation frequency

由于混沌信号具有类噪声的功率谱特性, 使得混沌电路广泛应用于保密通信、宽带通信、扩频通信、混沌雷达、电子干扰机等诸多领域。自 Kennedy M P 于 1995 年首次提出微波频段的 Colpitts 混沌振荡器以来, 众多相关的新结构^[1-3]被提出以提升输出信号频率和带宽, 其中文献[3]将混沌振荡基频 f_0 与晶体管截止频率 f_T 的比值提升到 0.12, 这些新结构从混沌理论的角度出发设计, 输出信号频率也难以突破限制。文献[4-5]从振荡器理论的角度重新思考混沌电路的设计, 将常规振荡器中的“负阻提升技术”引入到微波混沌振荡器的设计中^[6-7], 从理论和实验上设计验证了双电感负阻提升的混沌电路, 该电路将 f_0/f_T 的值提升到 0.2, 实现了混沌振荡基频和带宽的提升。

本文将放大器中的共发共基 Cascode 结构^[8]应用于振荡器中, 提出两级负阻提升模型, 通过理论推导分析, 给出通用负阻模型, 并将该模型应用于混沌电路的设计中, 进一步提升负阻和混沌振荡基频, 该电路的 f_0/f_T 值达到 0.46。

1 通用负阻模型的建立

Cascode 结构的 Colpitts 振荡器可以看作由上级 Colpitts 振荡器和下级 Colpitts 振荡器组成, 如图 1 所示, 其中下级振荡器即为经典结构 Colpitts 振荡器。此处只证明下级振荡器对上级振荡器的负阻补偿作用, 不考虑寄生电容的影响。

由电流和电压环路定理可以写出图 1 中下级 Colpitts 振荡器晶体管集电极和地之间的输入阻抗表达式:

$$Z_{\text{下}} = R_0 + \frac{1}{C_0 s} \quad (1)$$

$$\begin{cases} R_0 = \frac{g_m}{C_1 C_2 s^2} = -\frac{g_m}{\omega^2 C_1 C_2} \\ C_0 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中的 R_0 即为下级 Colpitts 振荡器的负阻表达式, C_0 为其等效电容, g_m 为晶体管 BJT 的跨导, C_1 、 C_2 分别为外接电容, $s=j\omega$, ω 为角频率。由式(1)和(2)可以给出图 1 中 Cascode 结构 Colpitts 振荡器的简化小信号等效模型, 如图 2 所示。

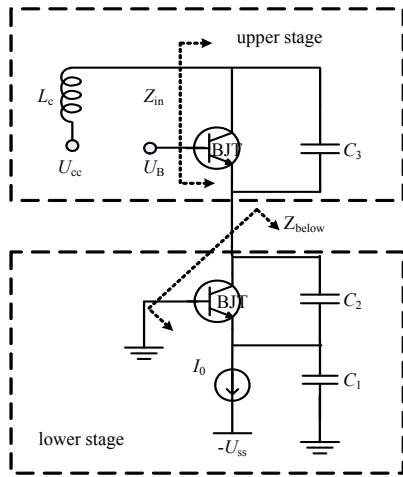


Fig.1 Cascode Colpitts oscillator
图 1 Cascode 结构 Colpitts 振荡器

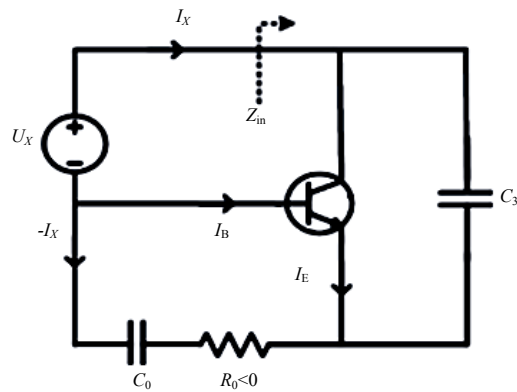


Fig.2 Simplified equivalent model of the circuit in figure 1
图 2 图 1 电路的简化等效模型

根据图 2 推导输入阻抗 Z_{in} 的表达式, 由环路电压定理得到:

$$\begin{cases} U_X = (I_X - g_m U_{BE}) \frac{1}{C_3 s} + I_X \left(\frac{1}{C_0 s} + R_0 \right) \\ U_{BE} = -I_X \left(\frac{1}{C_0 s} + R_0 \right) \end{cases} \quad (3)$$

$$Z_{in} = \frac{U_X}{I_X} = R_{in} + \frac{1}{C_{in} s} \quad (4)$$

由式(1)、(2)、(3)、(4)得出:

$$\begin{cases} R_{in} = -\frac{g_m}{\omega^2} \left(\frac{1}{C_1 C_2} + \frac{1}{C_2 C_3} + \frac{1}{C_3 C_1} \right) \\ C_{in} = \frac{C_0 C_3}{(1 + g_m R_0) C_0 + C_3} \end{cases} \quad (5)$$

实际电路设计中为了方便调试, 一般选择 C_1, C_2 和 C_3 的数值相近, 因此,

$$\frac{1}{C_1 C_2} + \frac{1}{C_2 C_3} + \frac{1}{C_3 C_1} \approx 3 \frac{1}{C_1 C_2} \quad (6)$$

比较式(2)和式(5), 可得:

$$R_{in} \approx 3R_0 \quad (7)$$

由式(7)得出, 相较于经典单级 Colpitts 振荡器, 两级 Colpitts 振荡器的负阻提升了约 2 倍。

基于以上理论推导, 可以将图 1 的 Cascode 结构 Colpitts 振荡器等效为图 3 所示的两级结构振荡器的通用负阻模型, 实际设计中, 可以将负阻 R_0 替换为任何负阻电路单元, 实现对单级 Colpitts 振荡电路负阻的提升。

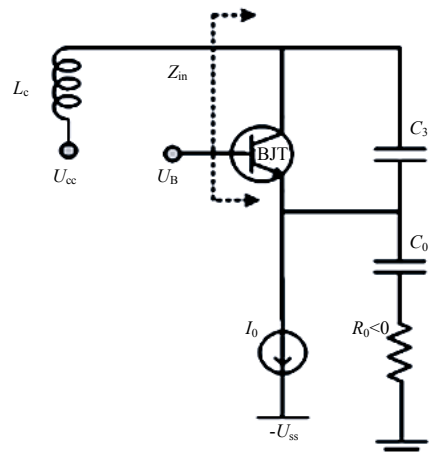


Fig.3 General negative resistance model of Cascode oscillator
图 3 Cascode 结构振荡器的通用负阻模型

2 混沌电路设计

根据图 3 通用模型设计的 Cascode 结构 Colpitts 混沌电路如图 4 所示。电路主要由混沌振荡环路、偏置电压、恒流源偏置、输出隔离和测试点几个模块构成。 R_5 为可调电阻，取值在 $100\ \Omega$ 以内。测试点 U_a 主要用于输出信号与 U_b 对比并形成混沌吸引子图，不作为实际电路的输出端口，其中 R_{10} 取 $500\ \Omega$ 以上。偏置电压模块中的电容 C_4 取值在 $1\ 000\ \text{pF}$ 以上，起到将 Q_2 的基极射频接地的作用。给定振荡环路元件参数 R_s, L_B, L_C 和 C_1, C_2, C_3 的情况下，调节 U_{CC} 和 U_B 使电路处于混沌振荡状态。

利用射频仿真软件(Advanced Design System, ADS)对图 4 所示的 Cascode 结构 Colpitts 混沌电路和文献[5]中的单级 Colpitts 混沌电路进行仿真对比，验证两级负阻提升结构能有效提升电路混沌振荡频率。

仿真中晶体管模型采用 BFG520(截止频率 $f_T=9\ \text{GHz}$)，振荡回路 Q 值取经验值 1.8 所在的区间，并以此为依据取电容电感的值，实际仿真中根据频率及结果做相应微调。两级电路的基极电容 C_4 起到将 Q_2 基极射频接地的作用，取值要大。随着频率的提升，振荡回路中的电容、电感和电阻值均随之降低；由于电容值的降低，其对地阻抗也在降低，输出隔离的电阻 R_5 和 R_{10} 随之减小，可以部分抵消由于频率提升导致的输出信号减弱。

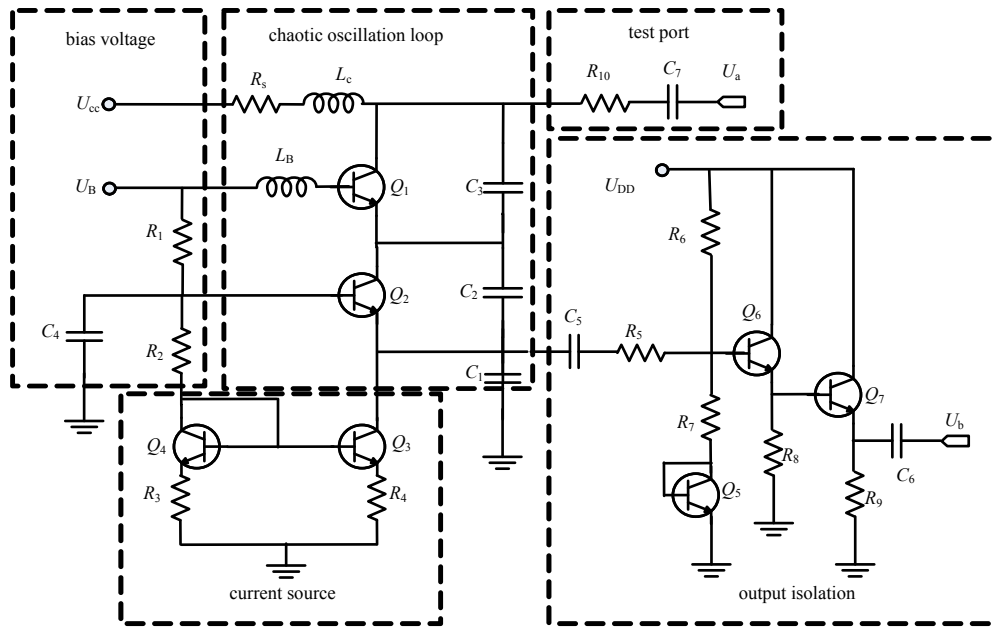


Fig.4 Chaotic Colpitts circuit based on Cascode structure
图 4 Cascode 结构 Colpitts 混沌电路

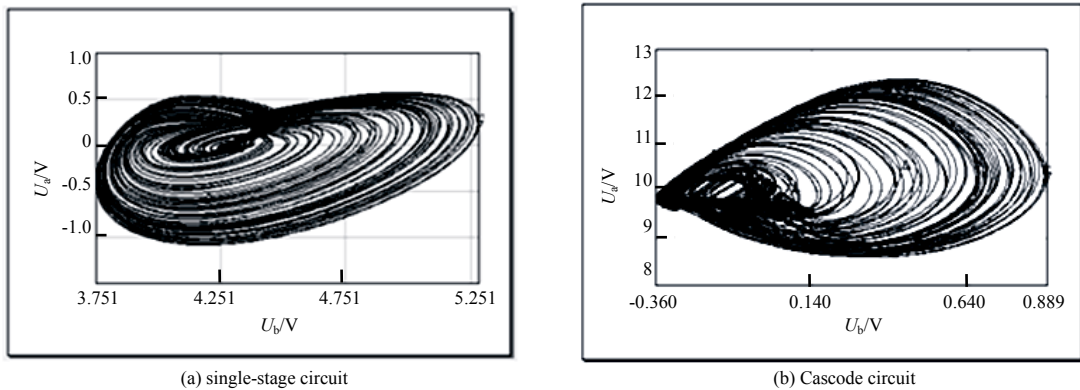


Fig.5 $f_0=3\ \text{GHz}$, comparison of chaotic attractor
图 5 $f_0=3\ \text{GHz}$, 混沌吸引子图对比

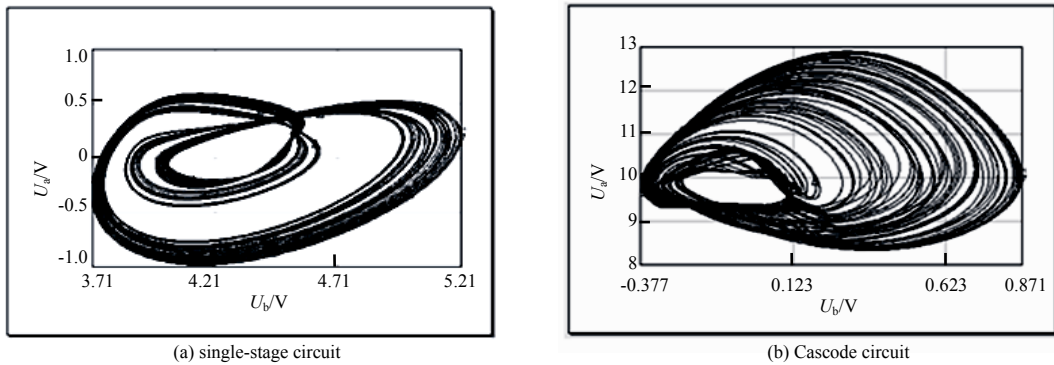


Fig.6 $f_0=4$ GHz, comparison of chaotic attractor
图 6 $f_0=4$ GHz, 混沌吸引子图对比

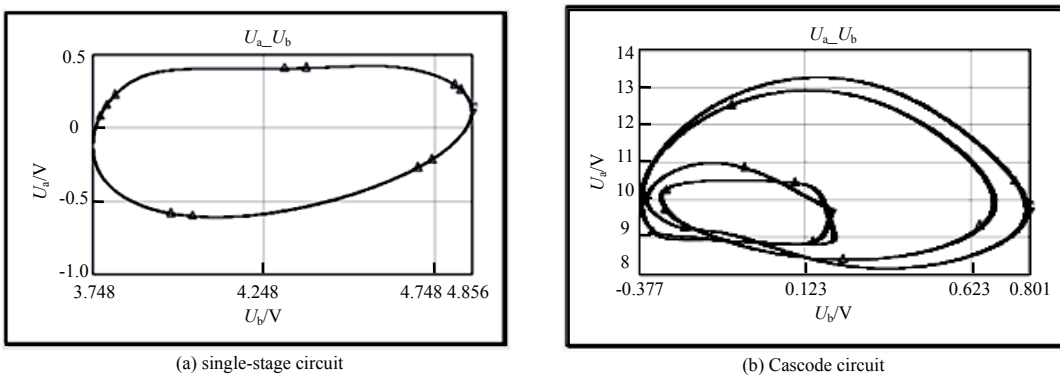


Fig.7 $f_0=5$ GHz, comparison of chaotic attractor
图 7 $f_0=5$ GHz, 混沌吸引子图对比

f_0 为 3 GHz, 4 GHz 和 5 GHz 时, 单级电路和 Cascode 两级电路的混沌吸引子图如图 5、图 6 和图 7 所示。图中纵坐标 U_a 和横坐标 U_b 分别对应图 4 中的测试点 U_a 和输出 U_b 的输出电压。当基频 $f_0=3$ GHz 时, 两个电路都处于完全混沌振荡状态, 吸引子图分布均匀; 当基频 $f_0=4$ GHz 时, 单级电路处于倍周期分岔状态, 两级电路仍旧处于混沌振荡状态; 当基频 $f_0=5$ GHz 时, 单级电路处于单周期振荡状态, 此时电路为单频点振荡器, 两级电路处于双频振荡状态。

图 5、图 6 和图 7 的仿真结果表明, Cascode 两级混沌电路由于负阻的提升, 其混沌振荡基频 f_0 较经典单级 Colpitts 混沌电路得到了大幅提升。图 8 所示为图 4 中 Cascode 混沌电路 U_b 端口的输出信号频谱图, 混沌振荡基频为 $f_0=4.2$ GHz, f_0/f_T 值达到 0.46。

3 结论

本文对 Cascode 结构振荡器的负阻进行了理论推导, 证明 Cascode 电路的负阻较经典单级 Colpitts 电路提升 2 倍, 并提出了两级负阻提升通用模型。基于该通用模型设计了 Cascode 两级结构混沌振荡器, 仿真结果表明, 新结构混沌振荡基频 f_0 较经典单级 Colpitts 混沌电路得到了大幅提升。

参考文献:

- [1] MYKOLAITIS G, TAMAS EVIČIUS A, BUMELIENĖ S. Experimental demonstration of chaos from Colpitts oscillator in VHF and UHF ranges[J]. Electronics Letters, 2004, 40(2): 91-92. DOI:10.1049/el:20040074.
- [2] TAMASŠEVIČIUS A, BUMELIENĖ S, LINDBERG E. Improved chaotic Colpitts oscillator for ultrahigh frequencies[J].

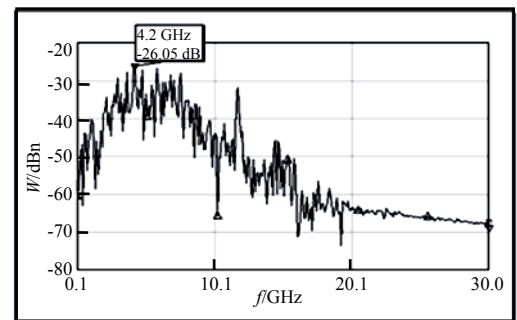


Fig.8 $f_0=4.2$ GHz, output spectrum
图 8 $f_0=4.2$ GHz, 输出频谱图

- Electronics Letters, 2004,40(25):1569–1570. DOI:10.1049/el:20047019.
- [3] LINDBERG E,TAMAS EVIČIUS A,MYKOLAITIS G,et al. Towards threshold frequency in chaotic Colpitts oscillator[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2007,17(10):3449–3453. DOI: 10.1142/S0218127407019196.
- [4] 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. DOI:10.1587/elex.11.20140902.
- [5] 陈文兰,王昊,郑林华,等. 负阻提升的微波混沌振荡器的设计[J]. 微波学报, 2016,32(5):55–57. (CHEN Wenlan,WANG Hao,ZHENG Linhua,et al. Design of microwave chaotic oscillator with enhanced negative resistance[J]. Journal of Microwaves, 2016,32(5):55–57.) DOI:10.14183/j.cnki.1005–6122.201605013.
- [6] WORAPISHET A,VIRUNPHUN S,CHONGCHEAWCHAMNAN M. A mutual negative resistance quadrature CMOS LC oscillator[J]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2004(4):IV–137–140. DOI:10.1109/ISCAS.2004.1328959.
- [7] GU Q J,XU Z,JIAN H Y. CMOS THz generator with frequency selective negative resistance tank[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2012,2(2):193–202. DOI:10.1109/TTHZ.2011.2181922.
- [8] 黄晓宗,黄文刚,刘凡,等. 一种提高放大器增益和带宽的设计技术分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(3): 468–472. (HUANG Xiaozong,HUANG Wengang,LIU Fan,et al. A gain and bandwidth enhancement technique for amplifier[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(3):468–472.) DOI:10.11805/TKYDA201503.0468.

作者简介:



陈文兰(1981–), 男, 安徽省池州市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为微波集成电路、有源相控阵天线.email:chenwenlan81@126.com.

郑林华(1981–), 男, 安徽省安庆市人, 高级工程师, 主要研究方向为微波收发组件及有源相控阵天线.

杨星华(1981–), 男, 合肥市人, 高级工程师, 主要方向为微波数字混合电路、有源阵列天线集成.

(上接第 518 页)

作者简介:



何林彦(1994–), 女, 四川省达州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为抗辐照.email:helinyan1994@outlook.com.

罗 萍(1968–), 女, 成都市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能功率集成电路与系统.

周 泉(1989–), 男, 成都市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为功率集成电路抗辐射加固设计.

凌荣勋(1994–), 男, 浙江省温州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为抗辐照集成电路.