

文章编号: 2095-4980(2018)02-0290-04

基于新颖调谐谐振器的低相噪 VCO 设计

吕俊材, 鲍景富*

(电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 介绍了一种采用新颖谐振器的低相位噪声窄带压控振荡器(VCO)的设计方法。该谐振器采用源与负载横向交叉耦合结构, 形成一个传输零点, 提高了谐振器的 Q 值。该谐振器通过弱耦合与变容二极管连接, 从而实现电压控制滤波器通带中心频率调谐。利用该谐振器设计了一个窄带 VCO, 并在先进设计系统(ADS)软件里仿真验证。该 VCO 中心频率 6.15 GHz, 在调谐电压从 0 到 15 V 的范围内调谐带宽 60 MHz, 相位噪声在整个调谐范围内优于 -132 dBc/Hz@1MHz, 输出功率为 8.4 dBm, 功率平坦度 ± 0.1 dBm。

关键词: 可调谐谐振器; 相位噪声; 压控振荡器; 交叉耦合

中图分类号: TN752

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201802.0290

Design a low phase noise VCO based on a novel tunable resonator

LYU Juncai, BAO Jingfu*

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: A novel low phase noise Voltage Controlled Oscillator(VCO) based on a new tuned resonator is introduced. This resonator adopts cross coupling between the source and load port and can produce a transmission zero so that improve the Q-factor. This resonator realizes the voltage controlled filter by using weak coupling between the resonator and the varactor. Finally the novel resonator is utilized to design a narrow band VCO which is simulated in Advanced Design System(ADS). The simulation results show that the center frequency of this VCO is 6.15 GHz, the tuning band is almost 60 MHz, phase noise is better than -132 dBc/Hz at 1 MHz offset frequency in the whole band, the output power is 8.4 dBm, and the flatness of the output power is ± 0.1 dBm.

Keywords: tunable resonator; phase noise; voltage controlled oscillator; cross coupling

振荡器是所有微波系统(例如雷达、通信、导航和电子战系统)的基本源。它们可被看成直流-射频的变换器。一个典型的微波振荡器,基本上是由一个有源器件(晶体管)和决定频率的无源谐振元件组成的^[1-2]。无源谐振单元包含如传输线、介质谐振器、腔体谐振器、变容管或钇铁石榴石(Yttrium Iron Garnet, YIG)小球等。随着微波技术的迅速发展,对信号源的噪声要求越来越高,故现在普遍采用锁相技术来实现低相位噪声源。在锁相环里,需要一个低噪声的压控振荡器,所以,研究低相位噪声压控振荡器对于实现低相位噪声源有重要意义。为了实现低相位噪声的压控振荡器,需要采用具有高 Q 值的谐振单元^[3],目前研究低相位噪声振荡器的工作大多采用的是固定频率的谐振器,为了实现压控可调谐,就需要谐振频率可以随控制电压变化而变化的谐振器,由于引入了变容二极管等可调元件,使得可调谐谐振器的 Q 值普遍没有固定频率的谐振器高,故而一般的压控振荡器的相位噪声比固定频率的低相位噪声振荡器差。

本文介绍一种新型的可调谐谐振器,利用该谐振器可以实现低相位噪声的压控振荡器。该谐振器采用源和负载横向交叉耦合,从而形成一个传输零点,提高了谐振器的 Q 值^[4]。谐振器通过弱耦合与变容二极管连接,从而实现电压控制滤波器通带中心频率调谐。利用该谐振器,设计了一款窄带低相位噪声压控振荡器,该振荡器可用作点频锁相环的压控振荡器。

收稿日期: 2016-11-23; 修回日期: 2017-01-10

基金项目: 国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金资助项目(U1430102)

*通信作者: 鲍景富 email:baojingfu@uestc.edu.cn

1 压控调谐谐振器

图 1 中展示了压控调谐谐振器的基本结构。尺寸如下：压控电压馈线 $l_1=7\text{ mm}$ ，谐振单元长度 $l_2=14\text{ mm}$ ，输入输出耦合线 $l_3=4.5\text{ mm}$ ， $g_1=0.2\text{ mm}$ ， $g_2=0.2\text{ mm}$ ， $g_3=0.2\text{ mm}$ ，通孔直径 $d=0.8\text{ mm}$ ，变容二极管采用 MACOM 公司的 MA46471 变容管，其调节电压从 1 V 变到 10 V 时电容量从 0.5 pF 变到 3 pF，Q 值为 4 000@50 MHz。该压控调谐谐振器实现时采用半波长的谐振单元，同时源和负载的交叉耦合形成了另外一个传输零点。在半波长谐振器的两端，用 U 型耦合器将变容二极管耦合进入谐振器，以便进行调谐，为了使变容二极管的接入不影响谐振器的 Q 值，这里需要将变容二极管弱耦合入谐振器。

为了产生一个传输零点，需要引入交叉耦合，由于要构成压控振荡器，一般谐振器不太建议采用高阶谐振单元，高阶谐振单元会引入振荡器稳定性的问题，特别是对于宽带调谐，采用高阶谐振器的振荡器的稳定性很难把控^[1]。图 2 给出了谐振单元的拓扑图和其等效电路。由拓扑图可知，该谐振器为全规范型滤波器^[5]，由于只有一个谐振器，所以最多只能有一个传输零点。在图 2(b)中 l_s 是端口 1 和端口 2 的微带等效电感， C_r 和 l_r 表示半波长谐振器的等效电容和电感， M_1 是源和负载耦合系数， M_2 是有源和谐振器间的耦合系数， M_3 是负载与谐振器之间的耦合系数。

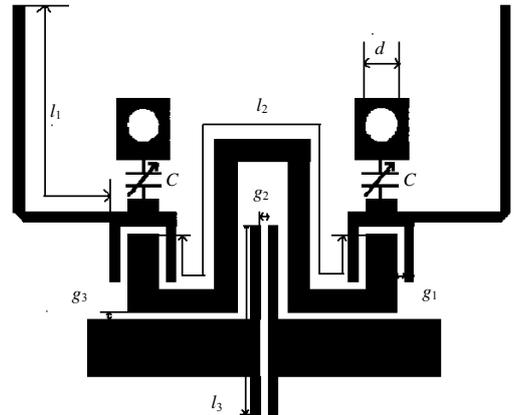


Fig.1 Structure of the tunable resonator
图 1 可调谐谐振器的结构

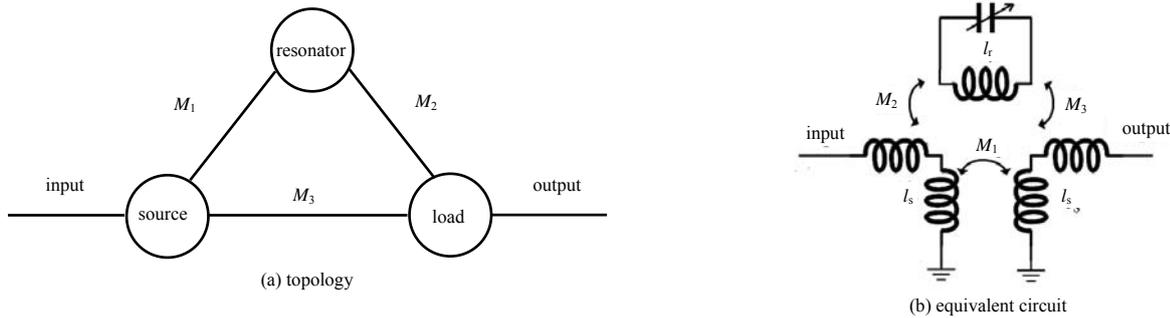


Fig.2 Analysis figure: (a) topology, (b) equivalent circuit
图 2 谐振单元分析图：(a) 拓扑图，(b) 等效电路图

为提高谐振器的 Q 值，降低振荡器相位噪声，源负载电路和半波长谐振器间的耦合系数必须要设置为弱耦合。间隙 g_3 会直接影响到耦合系数 M_2, M_3 ，通过 ADS 仿真软件确定最佳的尺寸，本文的设计尺寸为：间隙 $g_3=0.2\text{ mm}$ 。为了使谐振器选频特性陡峭， M_1 应该尽可能大，即 g_2 要小，但是， g_2 小了谐振器的插入损耗也会变大，而且考虑到加工精确度，这里 $g_2=0.2\text{ mm}$ 。

图 3 给出了谐振器的 ADS 仿真结果，根据所用变容二极管的特性，在设计时用电容代替变容二极管。图 3 给出了谐振器随不同变容二极管电容值的频率响应曲线，表 1 给出了变容二极管电容值与谐振器谐振频率之间的数值关系。根据图 3 所示的结果可以看出，该谐振单元的调谐范围从 5.98 GHz 到 6.04 GHz。由于引入了传输零点，根据 Leeson 相位噪声模型^[6]，振荡器的相位噪声性能得到提升。

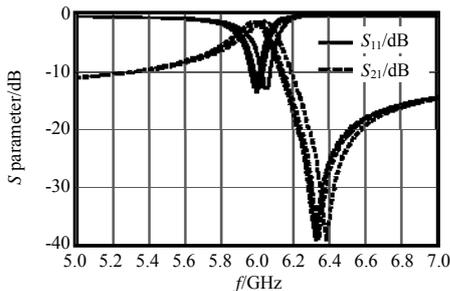


Fig.3 Simulation results of the S parameter vs. tuned diode value
图 3 可调谐谐振器 S 参数随变容二极管电容量变化的仿真结果

表 1 变容二极管电容量与谐振器谐振频率的关系
Table1 Value of tunable diode vs. resonating frequency

capacitance/pF	center frequency/GHz
0.5	6.04
1.0	6.02
1.5	6.00
3.0	5.98

2 基于压控调谐谐振器的低相位噪声 VCO 设计

对于并联结构的振荡器，必须满足环路方程^[7]：

$$S_{11}S_{22} = (1 - S_{12})(1 - S_{21}) \quad (1)$$

式中： S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22} 是从环路一点断开环路构成的二端口网络的 S 参数。

图 4 给出了基于该谐振器的低相位噪声 VCO 的版图图片，其中： $U_c=2$ V, $R_1=300$ Ω (0603 封装), $R_2=6.8$ k Ω (0603 封装), $R_3=R_4=300$ Ω (0603 封装), $C_1=1.8$ pF(0603 封装), D_1 与 D_2 为变容二极管 MA46471, 晶体管是 BFP405, output 是电路输出端，通过 SMA 接头与外界连接, U_{tuned} 为调谐端，其调谐电压从 0 V 到 15 V。整个电路静态工作点设置在 $U_c=2$ V 和 $I_c=12$ mA。有源器件为环路提供能量实现振荡器的稳定振荡。该振荡器设计在罗杰斯 RO4350 的介质基片之上，它的介电常数为 3.66, 正切损耗角为 0.004, 基片厚度为 0.508 mm。在设计振荡器的环路时，采用了先进设计系统(Advanced Design System, ADS)仿真软件。

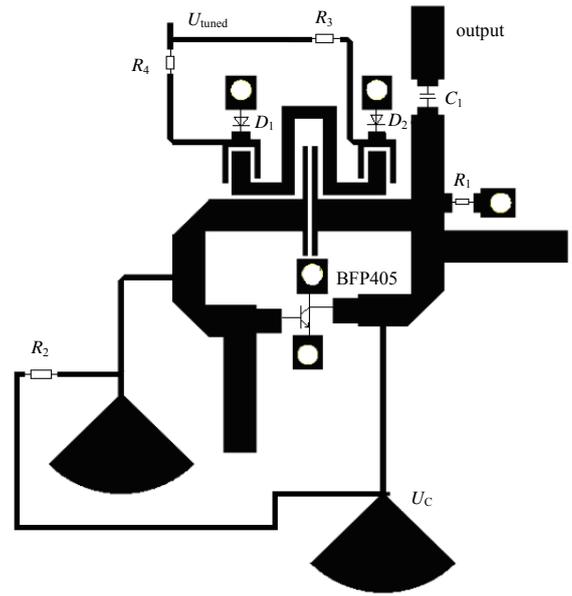


Fig.4 Layout of the low phase noise VCO
图 4 低相噪窄带 VCO 版图

3 基于压控调谐谐振器的低相位噪声 VCO 仿真结果

在 ADS 中进行 EM 仿真，其 VCO 中心频率为 6.15 GHz, 调谐范围从调谐电压为 0 V 时的 6.115 GHz 到调谐电压为 15 V 时的 6.18 GHz, 调谐带宽 60 MHz; 在整个调谐范围内输出功率约为 8.4 dBm, 功率平坦度为 ± 0.1 dBm; 仿真得到在所有调谐范围内振荡频率偏移 1 MHz 的地方的相位噪声优于 132 dBc/Hz。图 5 给出了仿真结果。

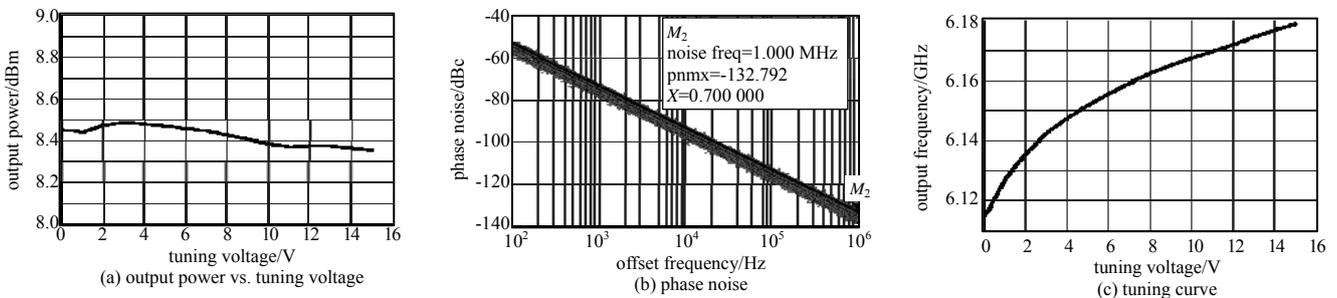


Fig.5 Simulation results: (a) output power vs. tuning voltage, (b) phase noise, (c) tuning curve

图 5 VCO 仿真结果: (a) 输出功率与调谐电压关系, (b) 整个调谐范围内的相位噪声曲线, (c) VCO 调谐曲线

另外，还有一种通用的评判相位噪声的标准品质因子(Figure Of Merit, FOM)^[8]，该 FOM 可以通过式(2)进行计算：

$$FOM = -20 \log \left(\frac{f_0}{\Delta f} \right) + L(\Delta f) + 10 \log \left(\frac{P_{DC}}{1 \text{ mW}} \right) \quad (2)$$

式中： f_0 是自由振荡频率； Δf 是偏移频率； P_{DC} 是振荡器的直流功率消耗。

从式(2)计算出振荡器的 FOM 是 -193.8 dBc/Hz。

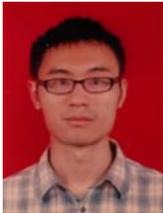
4 结论

本文介绍一种新型的可调谐谐振器，该谐振器通过源和负载之间的交叉耦合，产生了一个传输零点，提高了选频特性。利用该谐振器设计了一款低相位噪声的窄带压控振荡器，并在 ADS 软件里仿真验证。该 VCO 中心频率 6.15 GHz, 调谐带宽 60 MHz, 输出功率在整个调谐范围内约为 8.4 dBm, 相位噪声在整个调谐范围内优于 -132 dBc/Hz@1 MHz。该结构简单有效，设计加工方便，能够应用于频率合成器中低噪声 VCO 的设计。

参考文献：

- [1] ANDREI GREBENNIKOV. RF and microwave transistor oscillator design[M]. New York:Wiley & Sons, 2007.
- [2] ROHDE U L,PODDAR A K. Novel multi-coupled line resonators replace traditional ceramic resonators in oscillators/VCOs[C]// 2006 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition. Miami,FL,USA:IEEE, 2006:432-442.
- [3] CHOI J,SEO C. Low phase noise VCO using microstrip square open loop multiple split ring resonator[C]// 2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Atlanta,GA,USA:IEEE, 2008:1469-1472.
- [4] CHOI I,NICK M,MORTAZAWI A. Low phase-noise planar oscillators employing elliptic-response bandpass filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009,57(8):1959-1965.
- [5] CAMERON R J,MANSOUR R,KUDSIA C M. Microwave filter for communication system fundamental design and application[M]. New York:Wiley & Sons, 2007.
- [6] LEESON D B. A simple model of feedback oscillator noise spectrum[J]. Proceedings Letter, 1966,54(2):329-330.
- [7] WEBER R J. Introduction to microwave circuit radio frequency and design application[M]. New York:Wiley & Sons, 2001.
- [8] TIEBOUT Marc. Low-power low-phase-noise differentially tuned quadrature VCO design in standard CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2001,36(7):1018-1024.

作者简介：



吕俊材(1992-), 男, 四川省绵阳市人, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为微波毫米波电路与系统.email:1097203833@qq.com.

鲍景富(1964-), 男, 浙江省义乌市人, 博士, 教授, 主要研究方向为频率合成技术、MEMS 技术.

(上接第 252 页)

- [12] 华洋,宋志杰,王良. 解析小波域 MVDR 自适应波束形成[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009,39(S):463-466. (HUA Yang,SONG Zhijie,WANG Liang. Analytic wavelet domain MVDR algorithm[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009,39(S):463-466.)

作者简介：



王洋(1986-), 男, 重庆市人, 博士, 副教授, 主要研究方向包括天线理论与设计、电波传播、电磁超材料、阵列信号处理, 在国内外高水平期刊及会议上发表论文10余篇.email:wangyang@cqupt.edu.cn.

郇铭清(1995-), 女, 石家庄市人, 在读本科生, 主要研究方向多维信号处理、阵列信号处理.

邵羽(1987-), 男, 昆明市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为电磁波与人体的相互作用、新材料的电磁特性以及天线理论与设计等方面的研究与教学.

林峰(1978-), 男, 山东省莱阳市人, 高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向为 2G/3G/4G 无线终端系统开发工作.

舒强(1981-), 男, 重庆市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为通信与信息系统、多维信号处理、经济与管理理论等.