

免调节中频 VCO 的实现 (第一部分)

全文由两部分组成,前一部分讨论实现一个免调节、固定频率的中频压控振荡器(VCO)所需了解的基本设计原理,同时指出保证电路正常工作所需面临的挑战。在多数无线系统的架构中,VCO 都是一个关键部件。两次变换系统需要一个固定频率的中频 VCO,用来控制中频到基带和/或基带到中频的频率变换。

两次变换系统需要两个振荡器。典型地,第一个振荡器(射频 VCO)可在整个输入波段内调谐,第二个振荡器(中频 VCO)工作在预先设定好的单一频率下。射频 VCO 有现成的模块、IC 或分立元件电路可用,以模块或 IC 更为普遍。而就中频 VCO 来讲,小体积、低成本模块几乎无法从市场上找到。这可能是由于中频频率的多变性以及制造过程中无法进行激光微调的大值电感所致。因此,中频 VCO 常常采用分立电路或部分 IC 的方式实现。

为此,Maxim 首创了一种全新概念的 VCO IC,应用于无线系统正好可以弥补其他板级射频/中频 IC 在这方面的不足。本文的第二部分将介绍这种 IC 及其开发情况,并详细阐述它所能实现的简单、价廉的应用。

分立元件 VCO 能够提供足够的自由度来满足大多数系统的性能要求(调谐范围、输出功率、相位噪声、电流消耗、成本等等)。然而,对于具有较大批量、价格敏感的现代产品,震荡频率的生产线调整是不可接受的。这迫使射频工程师必须设计出一个不需要在安装过程中调整的 VCO,即免调整 VCO。这项设计任务并不简单,除了要掌握 VCO 的基本设计原理外,还需要射频工程师花费大量精力来保证设计的一致性,而且在各种变化因素(如元件参数、温度及电源电压等)允许的改变范围内,振荡器始终调谐在正确的频率。下面的讨论试图对这项任务的重要性给出一个评价,同时解释一些和免调节中频 VCO 设计有关的问题。

VCO 拓扑

有多种可行的振荡器拓扑都可用于构建一个实用的射频 VCO,其中一种已经在许多商品化 VCO 模块和不计其数的分立 VCO 电路中得到了成功应用,这就是 Colpitts 共集电极拓扑(图 1)。该拓扑可用于很宽的工作频率范围(从中频直到射频)。

一个灵活、廉价、并具有足够高性能的 VCO 可基于一个由廉价的表贴电感和变容二极管组成的电感-电容(LC)谐振槽路组成。振荡器槽路是一个并联谐振电路,控制着振荡频率,电感或电容的任何变化都会改变振荡频率。电感和变容电容可以并联或串联模式的网络形式实现可变谐振。

并联模式网络可用于较低频率,因为大值变容电容难以实现而电感可以做得比较大。并联模式配置还便于对振荡器做直观地分析。在本文余下的篇幅中,借助并联模式 LC 槽路的 Colpitts 振荡器对免调节中频 VCO 的设计进行阐述(图 2)。

Colpitts 振荡器在很多教科书中都有论述(Clarke 和 Hess 1978, Hayward 1994, Rohde 1998),并已推导出一些通用的和专用于 Colpitts 拓扑的方程,可用来描述振荡器的工作机理。振荡器在电路中被抽象为一个反馈放大器模型。精确的振荡频率表达可通过此模型中阻抗的平衡而得到,但所得表达式往往很复杂且无助于振荡器的设计。

另一方面,对于 Colpitts 振荡器可以采用一种简化的、精确性稍差的方法来加以分析,并得到一组更

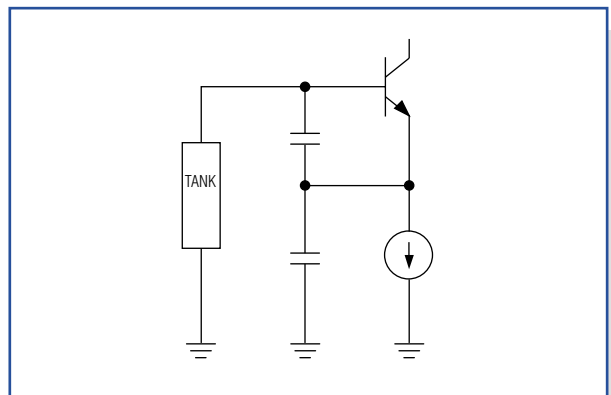


图1. 基本 Colpitts 振荡器。

清晰、更直观的设计方程，非常有助于单阶振荡器的设计。首先，Colpitts 振荡器可重画为一个带有正反馈的 LC 放大器(图 3)。从这个视点易于计算环路增益、振荡幅度和相位噪声。为了描述启动过程和振荡频率，最初的电路也可重画为一个负阻加谐振器结构(图 4)。从上述两个视点得到的一系列方程联合起来构成一组 Colpitts 振荡器的设计方程(Meyer 1998)。

Colpitts 振荡器基本设计方程

不考虑分布参数，并假定 $C_C \gg C_1$ 和 C_2 ，并有 $C_1 > C\pi$ ($C\pi$ 为三极管基-射结电容)。振荡频率(f_0)可按下式计算：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \times C_T}}, C_T = C_V + C_{12}, \quad (1)$$

$$C_V = \frac{C_{VAR} \times C_O}{C_{VAR} + C_O}, C_{12} = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

谐振电路的品质因数(Q_T)可按下式计算：

$$Q_V = \frac{1}{2\pi \times C_V \times R_S \times f_0}, R_{QC} = Q_V^2 \times R_S, \quad (2)$$

$$Q_T = \frac{R_{EQ}}{2\pi \times L \times f_0}, R_{EQ} = R_{QL} \parallel R_{QC}$$

振荡幅度可按下式估算：

$$V_O \cong 2 \times I_Q \times R_{EQ} \times \frac{J_1(\beta)}{J_0(\beta)}, \quad (3)$$

$$V_O \cong I_Q \times R_{EQ} \times 1.4$$

环路增益和起振条件按下式计算：

$$\text{环路增益} = g_m \times R_{EQ} \times \frac{1}{n}, \text{ 其中 } n = \frac{C_1 + C_2}{C_2} \quad (4)$$

起振条件：

$$\frac{g_m}{(2\pi \times f_0 \times C_1)(2\pi \times f_0 \times C_2)} \gg \frac{R_{EQ}}{Q_T^2}, \quad (5)$$

最小 2:1

距离中心频率一定频偏(f_m)处 Colpitts 振荡器的相位噪声(PN)可按下式计算：

$$PN = i_n^2 \times \frac{1}{V_O^2} \times \left(\frac{f_0}{2Q_O} \right)^2 \times \frac{R_{EQ}^2}{f_m} \quad (6)$$

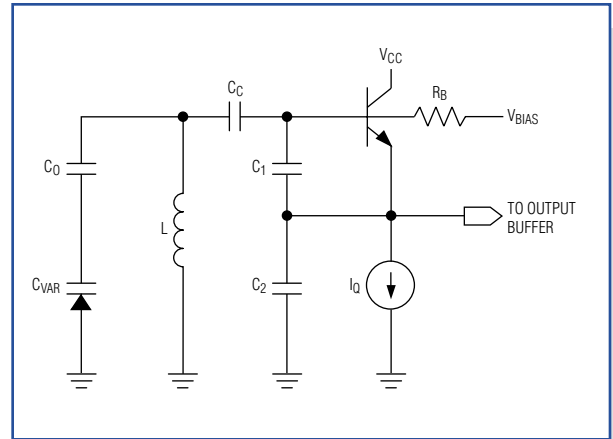


图2. Colpitts 拓扑用于 VCO。

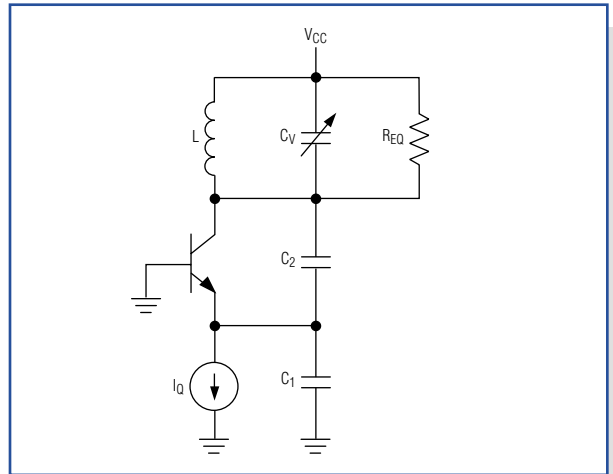


图3. LC 放大器模型。

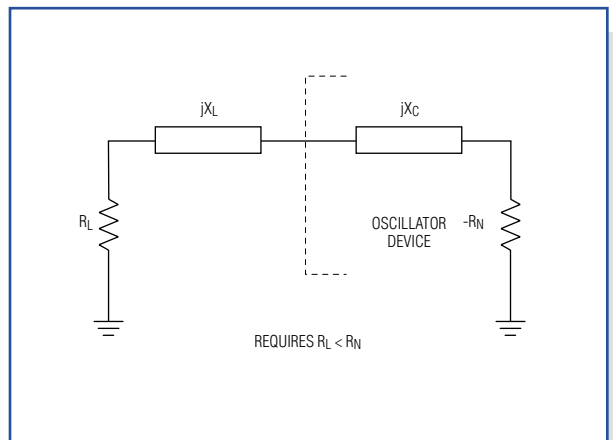


图4. 映像放大器模型。

免调节 VCO 的设计考虑

免调节 VCO 从概念上讲非常简单。只要振荡器具有足够宽裕的调谐范围来消除所有的误差源(如元件容差)所引起的频率偏移,振荡频率的调整就可以省去。初看起来,这项任务非常简单明了,只需提供足够的调谐范围来覆盖所有的误差源即可。然而,对于一个给定的调谐电压范围,有限的可变电容限制了频率调谐范围,而且, VCO 的电性能要求往往进一步将调谐范围限制在更窄的区间内。

不幸的是,过大的调谐范围还会给振荡器带来一些负面影响。很宽的调谐范围要求压变电容至槽路间有很重的容性耦合,这会严重降低谐振电路的品质因数 Q 。所带来的结果便是更大的相位噪声(谐振幅度与晶体管噪声之比降低);对调谐端噪声更高的灵敏度(这将直接转换为频率调制);压变电容两端过大的电压摆幅;潜在的启动问题;以及给环路滤波器设计带来困难等。这些因素导致的结论就是,过量的调谐范围不可接受。事实上,它不应大于吸收所有误差因素的最低限。

术语表

C_0 = 压变电容耦合电容

C_T = 总谐振电容

C_{VAR} = 压变电容

f_m = 以 Hz 为单位的相位噪声频率偏移

f_0 = 振荡频率

g_m = 双极晶体管跨导

i_n = 集电结散粒噪声

I_Q = 振荡晶体管偏流

Q_L = 电感 Q

Q_T = 谐振电路 Q

Q_V = 等效压变电容 Q

R_{EQ} = 谐振电路等效并联电阻

R_S = 压变电容串联电阻

V_0 = 谐振电压均方根值

较宽的调谐范围可通过两个容易理解的途径增大振荡器的相位噪声:降低谐振电路 Q 值和调谐端噪声的影响。要获得更宽的调谐范围,压变电容必须通过一个更大的电容耦合到谐振电路。这会降低 C_V (等效可变电容)的 Q 值,如方程 2 所示。 C_V 的 Q 值降低同时使谐振电路净 Q 值也降低,因而导致相位噪声增加,如方程 6 所示。

致使相位噪声增加的第二个因素是调谐输入端的热噪声,它会产生频率调制的边带噪声。该项噪声随着调谐范围而增加,并有可能超过振荡器的固有相位噪声。由热噪声引起的相位噪声可由下式计算:

$$PN = 20 \log \left(\frac{\sqrt{2} \times K_V \times V_n}{2 \times f_m} \right), \text{ 其中 } K_V = \text{VCO 增益 (Hz/V)}, V_n = \quad (7)$$

V_{TUNE} 端频率 f_m 处的噪声密度 ($V/\sqrt{\text{Hz}}$)

显然,两种情况的相位噪声都随着调谐范围的增加而增大。因此要使免调节 VCO 保持较低的相位噪声,至关重要的是设定一个恰当的调谐范围,保证带宽要求并能容纳各种可预见的误差源。

由于压变电容耦合的加重,更多的谐振电压摆幅会出现在压变电容两端,而压变电容电压的摆幅必须加以限制以防压变电容被正向偏置。这就限制了谐振电路中的信号功率,因而也就影响到振荡器的相位噪声。最后,当谐振电路的等效串联电阻过大时还会带来起振问题(参见基本方程)。频率调谐范围过宽的 VCO 可能无法正常起振,尤其是在极限温度下。那么,要实现恰当的调谐范围,首先碰到的问题就是一 多少为合适?

影响振荡频率的误差源

为了适应影响振荡频率的各种误差源,免调节 VCO 的频率调谐范围必须增加。这些误差源可分

为两类：元件参数误差和设计对准误差。设定振荡频率的LC元件当然是非理想的，它们会带来以下问题：

- 元件之间的差异(容差)
- 不理想的性能(由于电感、电容以及引线串联电阻等造成有限的频率响应)
- 电路布线中的分布电容和电感造成的误差

另一方面，设计过程中在对准VCO调谐范围时的不确定因素还会导致设计对准误差。

元件容差

LC振荡器中影响振荡频率的每个容性和感性元件都具有有限的元件到元件精确度，而这种容许误差会给振荡频率带来误差。表1列出了振荡器中频率设定元件的典型容差。

表1. 振荡器中频率设定元件的典型容差

元件	容差
压变电容	±15% at $V_{TUNE} = 0.4V$, ±10% at $V_{TUNE} = 2.4V$
电感	±5%
电容	±5%
分布电容	±10%
分布电感	±6%
振荡元件阻抗	±15%

设计对准误差

设计对准作为一个振荡频率建立中的误差来源常常被忽视。为了充分利用现有的频率调谐范围，调谐边界必须相对于预期的振荡频率相对称。在建立这个中心点时的任何误差，主要是由元件模型的初始值或平均值的不精确性而引起，都会降低可用的调谐范围。为了在各种温度、电源电压、元件容差等条件下保证振荡频率，调谐范围必须足够宽，以便容纳该误差。

可以利用振荡频率公式计算出总的频率误差，只需对其中的每项元素乘以一个比例因子即可：

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \times C_T}}, C_T = C_V + C_{12}, \quad (8)$$

$$C_V = \frac{C_{VAR} \times C_O}{C_{VAR} + C_O}, C_{12} = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

还有一个最简单的办法可以计算出各种不同误差所造成的频率偏移，那就是利用一个电子数据表程序，其中包含了详细的基于L、C电路参数的振荡频率公式。

频率偏移和调谐范围

频率调谐范围可通过改变调谐电压获得，从 $V_{TUNE(LOW)}$ 到 $V_{TUNE(HIGH)}$ ，具有高、低频率边界(f_{HIGH} 和 f_{LOW})和一个位于 f_{HIGH} 和 f_{LOW} 中点的“中心”频率(f_{CENTER})(图5)。理想情况下，调谐范围应安排在使 f_{CENTER} 恰好位于期望频率的位置(图5a)。然而，元件误差和设计对准误差可能会使频率调谐区间发生偏移。

如果在最差情况下，系统提供的调谐电压不足，不能获得足够的频率调谐范围，则期望的振荡频率就无法达到(图5b)。显然，仔细确定调谐范围需求是很有必要的。这可通过以下方法实现，首先计算出所有误差源所引起的频率偏差，然后确定最差情况下的 $f_{LOW} < f_{OSC}$ 且 $f_{HIGH} > f_{OSC}$ (图5c)。

设计验证

线路板布局和元件选择完成之后，还需要对设计进行验证和测试(项目甚至超过多数射频电路)。通常，你必须检查调谐范围、启动性能、相位噪声等等性能是否符合设计要求。此外，测试必须基于一个统计有效的生产流程数量之上，以便确定调谐范围和平均中心频率，以及它们相对于预期振荡频率的相对位置。

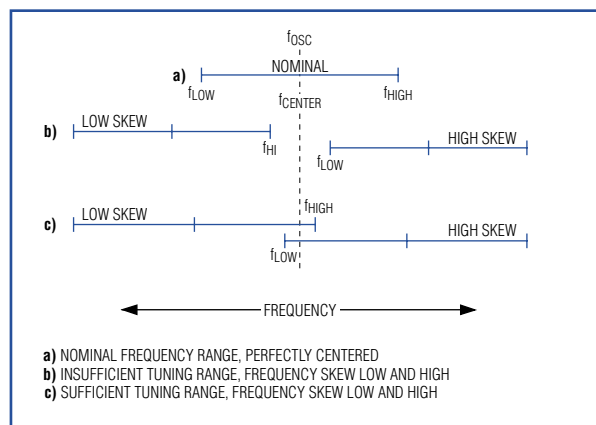


图5. 调谐范围和频率偏移。

所有这些工作都是得到一个稳定的、可重复生产并具有预期性能的设计所必需的。这项任务通常需要多次反复，因此，往往要花费数月的时间才能得到一个可以接受、并具有生产价值的分立元件设计。开发一个免调节中频VCO 要求仔细的电路设计、各种误差源的周详考虑、电路板的验证以及生产过程监控等，以确保设计的可实施性。现在，Maxim 已开发出新款IC 来迎接这个挑战(将在第二部分中介绍)，解决了VCO 的设计难题，同时显著缩短了实现免调节中频VCO 所必需的时间。

本文的第二部分将介绍这种IC 及其开发，并就其应用及性能情况加以详细讨论 (*Engineering Journal Vol. 40*)。同时包括一个简洁、小巧、廉价的应用实例。

参考文献

- Clarke, Kenneth, and Donald Hess. 1978. *Communications Circuits: Analysis and Design*. Chap. 6.
- Hayward, Wes. 1994. *Radio Frequency Design*. Chap. 7.
- Meyer, Dr. Robert. 1998. Internal communication.
- Rohde, Ulrich. 1998. *Microwave and Wireless Synthesizers*. Chap. 4.

射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书,课程从基础讲起,内容由浅入深,理论介绍和实际操作讲解相结合,全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程,培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合,全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作,同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习,可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>