

【本文献信息】王魏,黎希,宫召英,等.卫星电视天线射频电路中LC压控振荡器设计[J].电视技术,2012,36(21).

# 卫星电视天线射频电路中 LC 压控振荡器设计

王 魏,黎 希,宫召英,马晓英,杨丽君,王岳生

(重庆邮电大学 光电工程学院,重庆 400065)

**【摘要】**设计了一款应用于卫星电视天线电路中低功耗、低相噪的宽带单片集成压控振荡器。该振荡器利用PMOS尾电流源和MIM电容阵列结构。在保证调谐范围的前提下,有效地降低了相位噪声。使得该压控振荡器实现了3.384~4.022 GHz频段的覆盖,在中心频率为3.7 GHz时,100 Hz和1 MHz频偏处的相位噪声分别为-90.4 dBc/Hz和-119.1 dBc/Hz,工作电压下为1.8 V,功耗仅为2.5 mW。

**【关键词】**天线电路;LC压控振荡器;宽带;相位噪声

**【中图分类号】**TN919.8

**【文献标识码】**A

## LC VCO Design of Satellite TV Antenna RF Circuit

WANG Wei, LI Xi, GONG Zhaoying, MA Xiaoying, YANG Lijun, WANG Yueming

(College of Electronics Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**【Abstract】**A monolithic integrated voltage controlled oscillator(VCO)with low power,low phase noise and wide tuning range used in the satellite TV antenna RF circuit is designed. The PMOS tail current source and a MIM capacitor array structure is used so as to effectively reduce the phase noise, and ensure the enough tuning range. The proposed VCO achieved a tuning rang of 3.364 ~ 4.022 GHz, and the central frequency is 3.7 GHz, the phase noise is -90.4 dBc/Hz at 100 Hz and -119.1 dBc/Hz at 1 MHz offset while dissipating 2.5 mW from 1.8 V supply.

**【Key words】**antenna circuit;LC VCO;wideband;phase noise

## 1 卫星电视天线技术

随着卫星电视天线技术的发展,以及卫星电视天线设备应用的频率日益增加,射频集成电路在卫星电视天线系统中得到了广泛应用。压控振荡器(VCO)作为无线卫星电视天线接收电路中的一个重要模块,应当在具有更大的协调范围的同时也要具有更低的相位噪声。协调范围决定了覆盖接收频段的多少,相位噪声是决定接收质量和可靠性的重要参数。协调范围和相位噪声时常难以兼顾,因此宽带低噪声VCO是目前射频集成电路设计中的一个难点<sup>[1]</sup>。

常用的VCO实现方案有两种,即环形振荡器和电容电感振荡器(LC VCO)。由于LC VCO相对于环形VCO具有更低的相位噪声,因而低噪声VCO常采用电容电感的结构形式。本文对VCO的结构和相位噪声进行了分析,并采取多种降低相噪的方法,设计了一款低相位噪声高协调范围的VCO。

## 2 电路结构

本文设计的压控振荡器核心电路如图1所示,电感L和可变电容Cvar1,Cvar2组成谐振回路,NMOS对(M<sub>1</sub>,M<sub>2</sub>)和PMOS对(M<sub>3</sub>,M<sub>4</sub>)构成有源负电阻。采用PMOS管和NMOS管组成互补型交叉耦合电路结构能够有效地

抑制共模信号对电路的影响,如衬底噪声和电源电压噪声,且互补交叉耦合振荡器输出幅度是单NMOS交叉耦合管的两倍,从而使振荡器具有更好的相位噪声性能。C<sub>1</sub>为滤波电容,PMOS管M<sub>5</sub>,M<sub>6</sub>构成有源电流源。

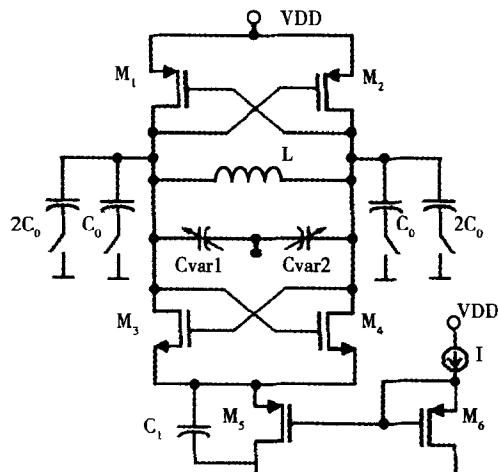


图1 振荡器电路结构

### 2.1 可变电容管

可变电容按工作特性和工艺可以分为MOS变容管和PN结变容管,MOS变容管又分为反型结构、耗尽型结构和积累型。积累型MOS变容管结构及等效电容如图2所示,在N阱中进行n<sup>+</sup>掺杂,这种结构能够阻止空穴注入沟道使其能工作在积累区和耗尽区,而无法形成反型层。

当栅极接正电压时,多数载流子在通道表面形成一个传导平面,电容的可变电容  $C_v$  是栅氧化层电容,此时的电容为最大电容  $C_{max}$ 。当栅电压变为负时,空穴被吸引到表面与电子中和,形成的耗尽区,此时可变电容是的电容是栅氧化层电容  $C_{ox}$ ,耗尽层随着电压的增加而增加,相比其他形式的变容管其具有较大的线性范围和较高的品质因数<sup>[2]</sup>。

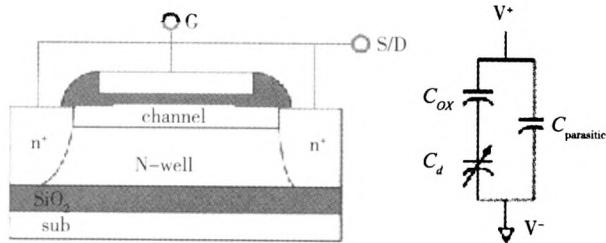


图 2 可变电容结构及等效电容

本设计采用的可变电容为 TSMC 0.18  $\mu\text{m}$  工艺库中的积累型 MOS 变容管,晶体管  $W = 2.5 \mu\text{m}$ ,  $L = 500 \text{ nm}$ , finger 数为 12, 电容的变化范围约为 90 ~ 190 fF。振荡器正常工作时,可变电容两端的电压可以看成是一个较大振幅的正弦电压信号,因此其瞬时电容值是周期性变化的,可变电容的容值约等于小信号电容的均值,可变电容上瞬时电流为

$$i(t) = C(v(t)) \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

式中:  $v(t)$  是振荡器瞬时输出电压,  $v(t) = A\sin(\omega t) + B$ , 由此可得一个周期内的平均电容为

$$C_{average} = \frac{2}{T} \int_0^T C(v(t)) \cos^2(\omega t) dt \quad (2)$$

为了保证可变电容总能工作在线性区可用一个定值电容在输出端和变容管之间进行交流耦合,同时进行直流偏置。这样就减小了输出信号直流电平及共模噪声对变容管正常工作的影响<sup>[3]</sup>。

## 2.2 电流与输出振幅

当偏置电流较小时,振荡器工作在电流有限区;而当偏置电流较大时,输出信号的幅度达到了饱和值,此时受电源电压限制。则此时振荡器工作在电压有限区。工作在电流有限区时,输出信号的振幅大小与电流源和 LC 谐振网络的等效电阻成正比,对于互补差分耦合结构,电流源则周期地提供峰值为  $-I_s \sim I_s$  电流方波。对于非互补型差分耦合结构,电流源周期性向开关管提供  $0 \sim I_s$  电流方波。对于这两种形式的结构,工作在电流有限区的输出信号振幅分别为  $V_o = \frac{4}{\pi} I_s \cdot R_T$  和  $V_o = \frac{2}{\pi} I_s \cdot R_T$ , 由此可见对于相同的电流源工作在电流有限区的互补差分结构

振荡器输出振幅比非互补结构的振幅大一倍,而高输出电压摆幅能够改善信噪比和相位噪声性能。因此对于低电流应用来说,互补型结构的压控振荡器对电流的利用率较高,输出振幅也较大。而当电流增大到一定值使输出信号的振幅达到饱和值时,振荡器便进入电压有限区。此时电流源漏极电流达到饱和,电流源进入线性区不再随参考电流而变化,振荡器输出振幅达到稳定<sup>[4-5]</sup>。此时的差分输出振幅为  $V_o \propto I_{max} \cdot R_T$ 。

## 3 相位噪声分析

相位噪声是基于线性时不变理论的,即认为振荡器是一个线性时不变系统。实际电路中存在着其他性质的噪声,其相位噪声相比理想 LC 振荡器沿  $\frac{1}{f^2}$  特性下降有一定差别,在较低的频偏时相位噪声降低速度明显大于  $\frac{1}{f^2}$ ,在较大的频偏时相位噪声不在随着频偏的增大而继续减小。Leeson 提出的经典线性时不变模型

$$L\{\Delta\omega\} = 10 \cdot \lg \left\{ \frac{2FkT}{P_{sig}} \cdot \left[ 1 + \frac{\omega_0}{(2Q\Delta\omega)^2} \cdot (1 + \Delta\omega_{\frac{1}{2}}) \right] \right\} \quad (3)$$

式中: $F$  为器件的噪声因子,是一个经验参数; $P_{sig}$  为谐振电路的平均功耗; $\omega_0$  为振荡频率; $Q$  表示有载条件下的谐振品质因数; $\Delta\omega$  为频率偏移量; $\Delta\omega_{\frac{1}{2}}$  为  $\frac{1}{f^3}$  和  $\frac{1}{f^2}$  区域的拐点频率。其模型典型曲线如图 3 所示。

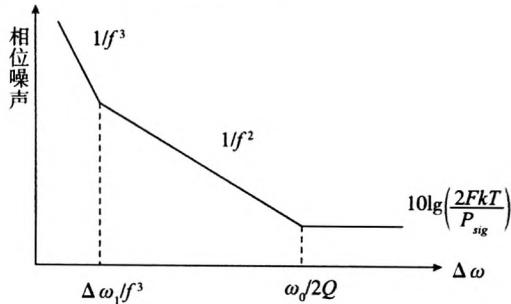


图 3 Leeson 线性时不变相位噪声模型

Rael 给出了 Leeson 模型公式中其相位噪声因子的表达式

$$F = 1 + \frac{4\gamma IR_{eq}}{\pi V_0} + \gamma \frac{4}{9} g_{mbias} R_{eq} \quad (4)$$

式中:  $I$  为电流大小; $\gamma$  为 MOS 管的沟道噪声系数; $g_{mbias}$  为电流源 MOS 管的跨导; $R_{eq}$  为谐振电路的等效电阻<sup>[6-7]</sup>。

根据式(3)并考虑到 Si 工艺的特点,在设计电路的时

候可以从3个方面来降低VCO的相位噪声:1)选择高Q值电感,但是考虑到片上电感的寄生参数对整个电路的影响,其电感值不可以太大,这样可避免寄生电容与电感产生谐振,否则可能导致频率过低,使VCO不能正常工作。2)增大VCO的输出信号振幅,但同时得考虑到输出功率与功耗的折中以及器件的击穿电压。3)采用全PMOS管设计尾电流源,埋沟道降低了MOS管沟道噪声,同时增加滤波电容,使得电流源在噪声通过滤波电容引入地,尽可能少地让电流源噪声进入LC谐振网络。

#### 4 电路仿真及结果分析

使用0.18 μm射频CMOS工艺库,在Cadence spectreRF射频仿真工具中进行仿真,其版图如图4所示。在1.8 V电源电压下电路的频率覆盖范围测试结果如图5所示,可以看出本设计实现了3.38~4.06 GHz的无盲区覆盖,并且电路在兼顾大频率覆盖范围的基础上实现了低相位噪声和低功耗性能。VCO正常工作时功耗小于2.5 mW,在1 MHz频偏处的相位噪声如图6所示为-119.1 dBc/Hz。

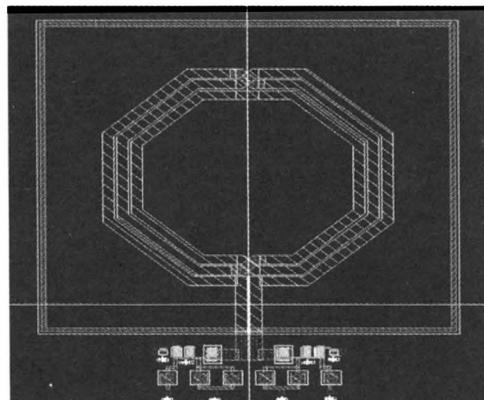


图4 VCO版图实现

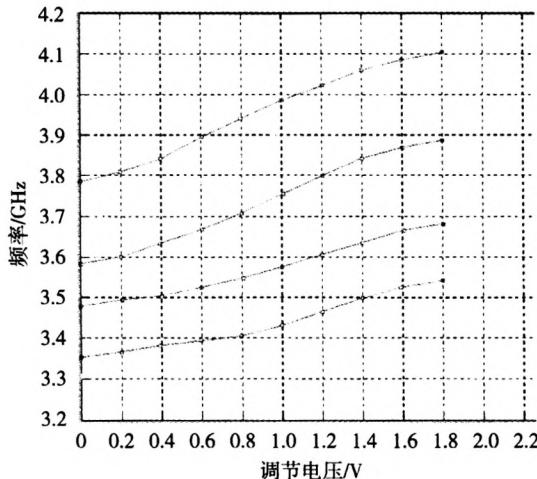


图5 VCO电压与频率调节曲线

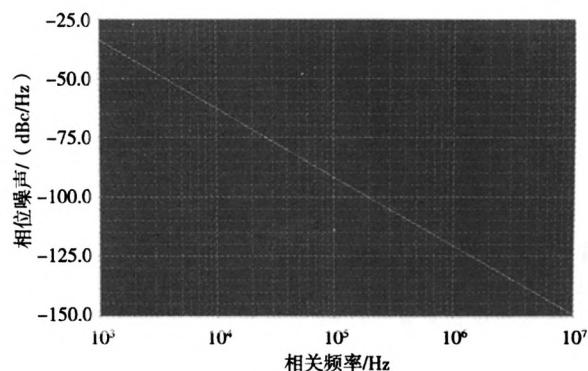


图6 VCO相位噪声曲线

#### 5 小结

本文采用TSMC 0.18 μm工艺库进行设计仿真,设计出了一个中心频率为1.8 GHz的差分压控振荡器。采用高Q值开关电容阵列结构电路来增大了协调范围,并利用过噪声滤波和PMOS电流源的方式减低了相位噪声。该VCO工作电压为1.8 V,功耗为2.5 mW,相位噪声值优于-119.1 dB@1 MHz,完全能满足频率覆盖范围内卫星电视天线接收系统的应用要求。

#### 参考文献:

- [1] LESSON D B. A simple model of feedback oscillator noises spectrum[J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(2):329-330.
- [2] REAL J J, ABIDI A A. Physical processes of phase noise in differential LC oscillators[C]//Proc. CICC 2000. [S. l.]: IEEE Press, 2000:569-572.
- [3] JERNG A, SODINI C G. The impact of devices type and sizing on phase noise mechanisms [J]. IEEE J Solid-state Circuits, 2005, 2 (40): 360-369.
- [4] YAN W, PARK C H. Filtering technique to lower phase noise for 2.4 GHz CMOS VCO[C]//Proc. ICSICT 2008. [S. l.]: IEEE Press, 2008:1649-1651.
- [5] 毛懿鸿. 3.2GHz CMOS电感电容压控振荡器设计[D]. 上海:上海交通大学, 2008.
- [6] 黄水龙, 王志华. 自协调VCO频段选择技术比较与设计[J]. 半导体技术, 2005, 30(10):54-57.
- [7] 迟青青, 李智群, 王志功. 1.8V低相位噪声全集成LC压控振荡器的设计[J]. 微电子学, 2006, 36(6):759-762.

#### 作者简介:

王魏,教授,博士,硕士生导师,主要从事集成电路设计和半导体方向的研究;

黎希,硕士生,主要从事射频集成电路设计方面的研究;

宫召英,硕士生,主要从事射频集成电路设计方面的研究;

马晓英,硕士生,主要从事射频集成电路设计方面的研究。

责任编辑:时雯

收稿日期:2012-04-25

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### 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，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

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

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.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>

---



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://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。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直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
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，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>