

2.4GHz 低相位噪声 CMOS 负阻 LC 压控振荡器设计

赵宇浩, 陈军宁, 吴秀龙, 梅振飞, 徐太龙, 鲁士滨

(安徽大学 电子科学与技术学院, 安徽 合肥 230039)

摘要: 为了有效降低工作于射频段的全集成 CMOS 负阻 LC 压控振荡器的相位噪声, 介绍了利用电阻电容滤波技术对振荡器相位噪声的优化, 并采用 Chartered 0.35 μm CMOS 标准工艺设计了一款全集成 CMOS 负阻 LC 压控振荡器, 其中心频率为 2.4GHz, 频率调谐范围达到 300MHz, 在 3.3V 电压下工作时, 静态电流为 12mA, 在偏离中心频率 600kHz 处, 仿真得到的相位噪声为 -121dBc/Hz。该设计有效地验证了电阻电容滤波技术对相位噪声的优化效果, 并为全集成低相位噪声 CMOS 负阻 LC 压控振荡器的设计提供了一种参考电路。

关键词: CMOS; 压控振荡器; 相位噪声; 频率范围

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2008)02-0170-03

Design of 2.4GHz CMOS Negative - Resistance LC Voltage - Controlled Oscillator of Low Phase Noise

ZHAO Yu-hao, CHEN Jun-ning, WU Xiu-long, MEI Zhen-fei, XU Tai-long, LU Shi-bin

(Institute of Electronic Science and Technology, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: In order to reduce the phase noise of the full - integrated CMOS negative - resistance LC voltage - controlled oscillator which is used in RF band, the way to optimize the phase noise that making use of RC filtering technology was introduced, and one voltage - controlled oscillator was realized with Chartered 0.35 μm CMOS standard technology. Its center frequency is 2.4GHz, and its frequency range is 300MHz, the static current is 12mA at 3.3V, the phase noise at 600 kHz away from the center frequency is -121dBc/Hz. The design effectively validated the RC filtering technology's function on optimizing phase noise, and gave one reference design about the full - integrated CMOS negative - resistance LC voltage - controlled oscillator of low phase noise.

Key words: CMOS; voltage - controlled oscillator; phase noise; frequency range

0 引言

随着无线通信产品的迅猛发展, 大大增大了对低成本、低功耗和高性能的通信集成电路的需求。现今各种通信系统对频率综合器的相位噪声要求越来越高, 相位噪声是信息传输质量和可靠性的最重要参数, 因此相位噪声是压控振荡器设计的最重要参数。有许多文章分别从理论、结构、工艺等方面叙述了相位噪声在改进上取得的进展^[1~5]。目前, 压控振荡器的研究已经比较成熟, 以电路结构来分主要分为两类: 环形振荡器和 LC 振荡器。环形振荡器易集成, 频率可调谐范围较大, 但相位噪声性能较差。LC 振荡器要求无源器件的品质因数较高, 需要较好的解决片上电感和变

容管问题才能较好地集成。文中对负阻 LC 压控振荡器相位噪声机理进行了分析, 利用 RC 滤波技术设计了一款性能优异的压控振荡器, 并进行了仿真验证。

1 相位噪声分析

负阻 LC 压控振荡器将利用有源器件产生负阻 - $g_{n(av)}$, 以补偿电感和可变电容器管上寄生电阻造成的损失。图 1 中 $g_{e0}(=1/R_{e0})$ 为谐振回路的固有谐振电导, 要建立振荡必须满足 $g_{n(av)} > g_{e0}$ 。

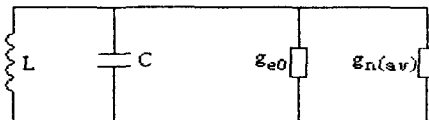


图 1 负阻 LC 振荡器原理电路

根据文献[1], 相位噪声的表达式可以表示为:

$$L\{\omega_m\} = \frac{4FkTR}{V_{RMS}^2} \left(\frac{\omega_0}{2Q\omega_m} \right)^2 \quad (1)$$

其中 F 是噪声因子, 它将整个电路的相位噪声归一化为 LC 谐振回路的相位噪声, 有源电路的噪声是振荡器

收稿日期: 2007-05-15

基金项目: 安徽省自然科学研究重点项目(2006kj012a); 安徽大学研究生创新项目(20073049)

作者简介: 赵宇浩(1979-), 男, 硕士, 研究方向为超大规模集成电路设计; 陈军宁, 教授, 博导, 研究方向为超大规模集成电路设计、VLSI 器件。

噪声的 F 倍, V_{RMS} 是振荡器幅度的均方根值, R 是谐振回路的等效并联阻抗。可以看出, 为使相位噪声最低, 输出幅度应最大。

根据相位噪声线性模型, 在电流限制区, 就是电流源 MOS 管处于饱和区时, 主要的噪声源有: LC 振荡回路等效电阻, 构成负阻的差分对和尾电流源, 则整个 VCO 的噪声因子为^[5]:

$$F = 1 + \frac{4\gamma IR}{\pi V_0} + \frac{4}{9} g_{m, \text{bias}} \gamma^R \quad (2)$$

式(2)中 F 包含了三项噪声: 第一项是归一化为 1 的谐振回路电阻噪声; 第二项是差分对管的噪声; 第三项是尾电流源的噪声。

2 电路设计

图 2 为文中采用的 CMOS 负阻 LC 压控振荡器的电路结构。

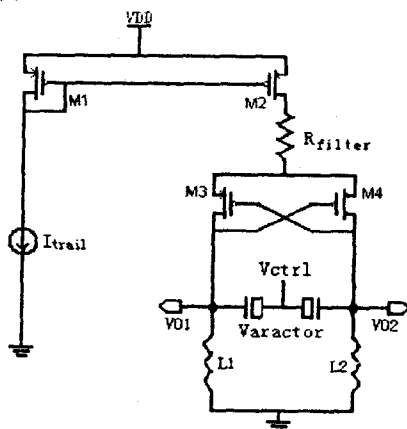


图 2 电路结构

2.1 差分对晶体管的选择

图 2 中的 M_3 、 M_4 两个 PMOS 晶体管为振荡器提供负阻, 它们交叉工作。这两个管子的 W/L 的选择影响到 AM-PM 转变和低频闪烁噪声。

晶体管进入饱和区发生在 $V_{\text{DS}} = V_{\text{GS}} - V_{\text{TH}}$ 时刻, 此时电流为^[6]:

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{\text{OX}} \frac{W}{L} (V_{\text{GS}} - V_{\text{TH}})^2 \quad (3)$$

由式(3)可以看出, 在 I_D 确定后, W/L 减小, 则过驱动电压 $V_{\text{GS}} - V_{\text{TH}}$ 应增大, 从而增大了 MOS 管的线性范围, 改善了 AM-PM 的转变。但是, 从 MOS 管的低频闪烁噪声公式^[2]:

$$\overline{V_n^2} = \frac{K}{C_{\text{OX}} W L} \frac{1}{f} \quad (4)$$

可以看出, 减小 W/L 会恶化低频闪烁噪声。所以差分对晶体管 W/L 的选择需要权衡各种影响, 选择一个最优的结果。

2.2 电流镜晶体管的选择

图 2 中的 M_1 、 M_2 两个 PMOS 管构成了电流镜。

管子中的高频噪声会通过寄生电容通向地, 低频噪声则会进入谐振回路。这些噪声在通过差分对晶体管时, 由于差分管开关动作的频繁进行使这些低频噪声上变频为 $1/f^3$ 噪声, 从而恶化振荡器的相位噪声。所以, 一般选择 PMOS 管构成电流镜, 因为 PMOS 管的闪烁噪声拐角频率相对于 NMOS 管要低, 从而产生较少的低频闪烁噪声。另外, 从式(3)可以看出, 构成电流镜的管子的 W/L 值应较大, 这样可以改善低频闪烁噪声。并且采用电流镜上部偏置结构, 这样它的顶部就是与 PMOS 管相连, 所以电流镜是置于 n 阱中, 而不是衬底, 这样对衬底噪声有较好的抑止。

2.3 电感、变容管的选择

谐振回路的电感采用工艺库中提供的电感模型。

谐振回路的变容管采用工艺库中提供的 PN 结变容二极管, 因为 PN 结变容管的 Q 值高, 线性度好, 有利于改善振荡器的相位噪声。

2.4 滤波电阻的选择

当振荡器输出幅度较大时 $V_{\text{DS}} < V_{\text{GS}} - V_{\text{TH}}$, 迫使差分对管进入线性区, 导致共模点阻抗降低, 此时有较多的谐振回路谐波泄漏, 其中以二次谐波为主, 从而降低了谐振回路的品质因数 Q 。在电流镜与差分对晶体管之间加入一个电阻 R_{filter} , 它与寄生电容谐振在 $2\omega_0$ 处, 这样共模点的阻抗为无穷大, 抑制了负阻阻抗降低引起的谐振回路品质因数 Q 降低的效应。同时, 由于电阻的宽带特性, 这种结构对其余的泄漏谐波也有一定的抑制。

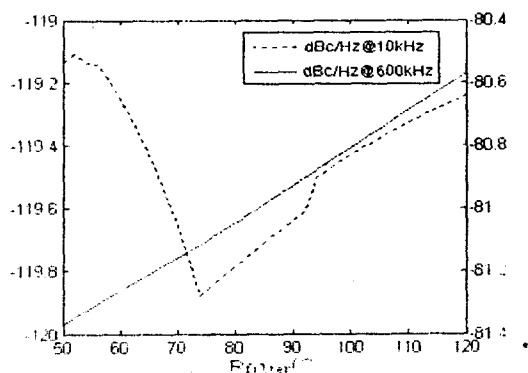


图 3 偏离中心频率 10kHz 和 600kHz 处相位噪声随 R_{filter} 的变化而变化的曲线

但是, 电阻本身会产生热噪声, 通过差分对管的频繁开关动作进入谐振回路, 也会恶化振荡器的相位噪声。图 3 是 R_{filter} 的值从 50Ω 到 120Ω 范围内, 振荡器在偏离中心频率 10kHz 和 600kHz 处的相位噪声值。从图 3 可知, 偏离中心频率 10kHz 处的相位噪声开始随着 R_{filter} 的增大而减小, 说明这个范围内电阻对谐波抑制的优化效果要超过电阻的热噪声对相位噪声恶化的结果, 随后, 电阻热噪声的恶化结果超过了抑制谐波的优

化效果,导致相位噪声总体呈恶化趋势。偏离中心频率 600kHz 处的相位噪声随着 R_{filter} 的增大而增大,说明此处电阻的热噪声对相位噪声的恶化占主导地位。经过仿真,确定 R_{filter} 取 74Ω 时比较合适。

3 仿真结果

该电路的仿真是在 Mentor 公司的模拟 IC 设计平台 Eldo RF 下进行,工艺库采用 Chartered 0.35μm CMOS 标准工艺。

图 4 为振荡器的起振波形,可以看出振荡器从开始起振到波形稳定大约需要 28ns 的时间。输出幅度为: -1.8V~1.6V。

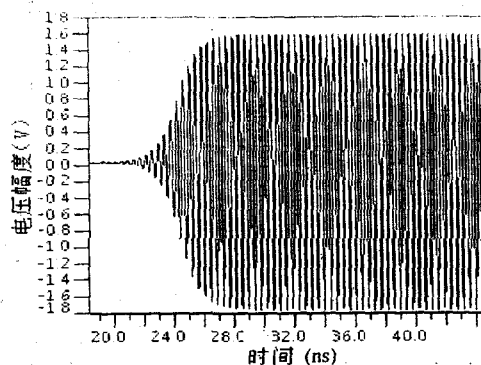


图 4 振荡器的起振波形

图 5 为振荡器的频率调谐特性曲线。在控制电压从 0.5V 变化到 3.0V 范围内,振荡器频率从 2.19GHz 变化到 2.49GHz,变化范围达到 300MHz。

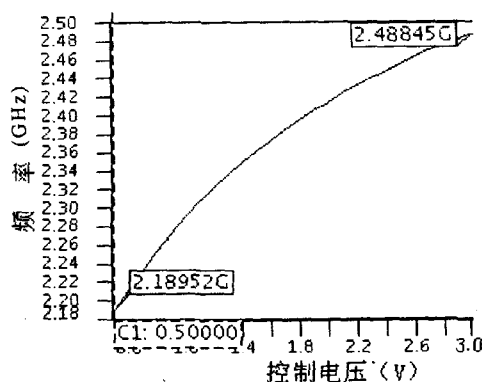


图 5 振荡器频率调谐特性曲线

图 6 是振荡器的相位噪声曲线,在偏离中心频率 600kHz 处测得的相位噪声达到 -121dBc/Hz。

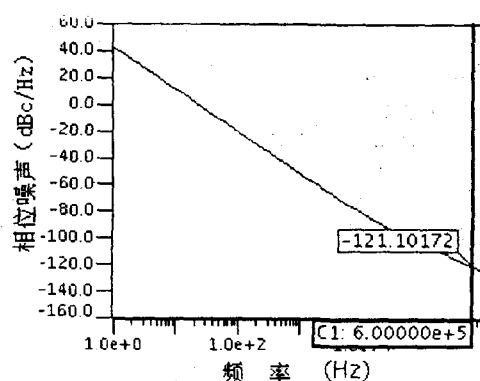


图 6 振荡器相位噪声曲线

4 总结

利用 Mentor 公司的模拟 IC 设计平台 Eldo RF 和 Chartered 0.35μm CMOS 标准工艺,设计了一个工作电压为 3.3V,静态电流为 12mA 的集成 CMOS 负阻 LC 压控振荡器。仿真结果表明,振荡器起振时间为 28ns,输出幅度范围为: -1.8V~1.6V,频率变化范围达到 300MHz,在偏离中心频率 600kHz 处的相位噪声为 -121dBc/Hz,验证了 RC 滤波技术对集成压控振荡器相位噪声的抑制,同时为全集成低相位噪声 CMOS 负阻 LC 压控振荡器的设计提供了一种参考电路。

参考文献:

- [1] Hajimiri A, Lee T H. A General Theory of Phase Noise in Electrical Oscillators[J]. IEEE Journal of Solid - State Circuits, 1998, 33(2): 179 - 194.
- [2] Lesson D B. A Simple model of feedback Oscillator noise Spectrum[J]. Proceeding of the IEEE, 1966, 54(2): 329 - 330.
- [3] Rael J J, Abidi A A. Physical processes of phase noise in differential LC oscillators[C]// IEEE Custom Integrated Circuits Conf. Orlando; [s. n.], 2000: 569 - 572.
- [4] Razavi B. A Study of Phase Noise in CMOS Oscillators[J]. IEEE Journal of Solid - State Circuits, 1996, 31(3): 331 - 343.
- [5] Hagazi E, Sjöland H, Abidi A. A Filtering Technique to low LC Oscillator Phase Noise[J]. IEEE Journal of Solid - State Circuits, 2001, 36(12): 1921 - 1930.
- [6] 拉扎维·毕查德. 模拟 CMOS 集成电路设计[M]. 陈贵灿译. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.

(上接第 169 页)

- [5] 概述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(10): 905 - 911.
- [6] 胡 栋. 静止图像编码的基本方法与国际标准[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2003.
- [7] DiLascia P. Displaying a JPG in your MFC Application[DB/

OL]. 2001 - 10. <http://msdn.microsoft.com/msdnmag/issues/01/10/c/default.aspx>.

- [8] 常 雄, 周 旭. 基于 GPRS 的信息采集系统智能终端的设计[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(10): 153 - 158.