

基于提高有载 Q 的120 MHz低相噪晶体振荡器设计

黄显核, 王 艳, 严刚峰

(电子科技大学空天科学技术研究院 成都 610054)

【摘要】从反馈振荡器的Leeson模型相位噪声表达式出发,分析了有载 Q 的重要性,针对基本皮尔斯振荡电路推导出有载 Q 的表达式,得到 C_1 越大,有载 Q 越高的结论。在此基础上设计了一个120 MHz AT切低相噪晶体振荡器样机,经实际测试,该振荡器在偏离载频100 Hz、220 Hz、1 kHz和底部相位噪声分别达到了-130 dBc/Hz、-142 dBc/Hz、-155 dBc/Hz和小于-175 dBc/Hz。结果表明,从提高有载 Q 出发对低相噪晶体振荡器进行设计是可行的。

关键词 晶体振荡器; 相位噪声; Leeson模型; 有载 Q ; 皮尔斯振荡电路

中图分类号 TN75

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.05.029

Design of 120 MHz Low Phase Noise Crystal Oscillator Based on Improving the Loaded Q

HUANG Xian-he, WANG Yan, and YAN Gang-feng

(Institute of Astronautics & Aeronautics, University of Electronic Science & Technology of China Chengdu 610054)

Abstract The importance of the loaded Q are analyzed on the basis of phase noise equation of Leeson model in feedback oscillator, the formula of loaded Q is derived by the analysis of Pierce oscillator circuit, and we can draw a conclusion that the larger C_1 is, the higher loaded Q becomes. Based on this conclusion, a design of the prototype 120 MHz AT-cut crystal oscillator is presented and the experiments are carried out. The measurement results of phase noise are -130 dBc/Hz@100 Hz, -142 dBc/Hz@220 Hz, -155 dBc/Hz@1 kHz and the phase noise floor better than -175 dBc/Hz. Experimental results show that it is feasible to design low phase noise crystal oscillators based on improving the loaded Q .

Key words crystal oscillators; phase noise; Leeson model; loaded Q ; Pierce oscillator circuit

随着现代通信技术的发展,高稳定度低相噪晶体振荡器的需求迅速增加。在卫星通信、远距离微弱信号接受、雷达系统等应用场合对系统基准晶振频率源的输出相位噪声提出了十分严格的要求。因此,研究晶体振荡器输出谱的形成机理,从而得出如何降低相位噪声、提高频谱纯度的方法成为振荡器研究主要需要解决的问题。

本文在Leeson模型^[1-7]的基础上分析了振荡器相位噪声表达式,特别是有载 Q 的重要性,并结合基本皮尔斯振荡电路推导出了有载 Q 的表达式。在此基础上以一个120 MHz晶体振荡器的实例进行了设计,并给出了其相位噪声的实际测量结果。从而可以看出从有载 Q 出发对低相噪晶体振荡器进行设计是可行的。

1 振荡器的Leeson模型

反馈振荡器的Leeson模型^[1]如图1所示,模型是

一个相位正反馈系统,由放大器和用于滤波作用的谐振回路组成^[2]。振荡器可以看作一个通过滤波器反馈的放大器。如果放大器增益足够克服滤波器衰减,并且相移满足 $2n\pi$ 的条件,就会产生振荡。当振荡振幅被限制在一定范围内,可使放大器工作在近似线性状态,Leeson模型就可描述边带噪声的主要特点。

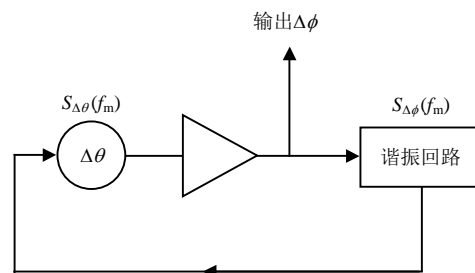


图1 反馈振荡器的Leeson模型

图1中Leeson模型的谐振回路通常是一个RLC电路,即带通滤波回路。在此基础上,根据信号传

收稿日期: 2009-07-21

基金项目: 2007年度四川省学术和技术带头人培养基金

作者简介: 黄显核(1965-),男,教授,主要从事频率控制技术方面的研究。

输理论可知,一个带限的已调制RF带通信号,通过一个带通滤波器的传输函数等于调制信号通过该带通传输函数的等效低通滤波器的传输函数。结合放大器内部相位噪声谱密度与振荡器输出端相位噪声谱密度之间的关系,可推导出振荡器的功率谱密度函数为^[3]:

$$S_{\Delta\phi}(f_m) = S_{\Delta\theta}(f_m) \left[1 + \left(\frac{f_0}{2Q_L f_m} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中 f_m 为偏离载波频率; f_0 为振荡中心频率; Q_L 为有载品质因数; $S_{\Delta\theta}(f_m)$ 为放大器内部相位噪声谱密度,它与拐角频率 f_c 、偏离载波频率 f_m 、噪声系数 F 、波尔兹曼常数 k 、绝对温度 T 等参数有关; $S_{\Delta\phi}(f_m)$ 为振荡器输出端相位噪声谱密度。

从Leeson的相噪模型分析可知^[2]:增大有载品质因数 Q_L 可以改善在给定偏离频率下的相位噪声。在线性反馈系统中,Leeson公式是确定反馈振荡器相位噪声的非常有用的工具。然而,成功地应用该模型需要根据实际振荡器结构和电路仔细确定包含在公式的参数。为了得到更好的相位噪声谱密度,必须综合选择振荡器的工作参数,就品质因素 Q_L 而言,它的高低不仅影响相位噪声谱密度函数的构成成分,而且还影响其强弱分布,所以高 Q_L 谐振回路

$$\mathbf{Z} = \frac{1}{j\omega L(1+j\omega C_1 R_C)(1+j\omega C_2 R_B) + R_B(1+j\omega C_1 R_C) + R_C(1+j\omega C_2 R_B)} \cdot \begin{bmatrix} R_B[j\omega L(1+j\omega C_1 R_C) + R_C] & R_B R_C \\ R_B R_C & R_C[j\omega L(1+j\omega C_2 R_B) + R_B] \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据式(3)和式(4)可求得有载品质因数为:

$$Q_L = \frac{\omega}{2} \left| \frac{d}{d\omega} \ln \frac{R_B[j\omega L(1+j\omega C_1 R_C) + R_C]}{R_B R_C} \right|_{\omega=\omega_0} = \frac{\omega_0}{2} \left| \frac{R_C}{j\omega_0 L(1+j\omega_0 C_1 R_C) + R_C} \times \left(\frac{jL}{R_C} - 2\omega_0 L C_1 \right) \right| = \frac{\omega_0}{2} \sqrt{\frac{L^2(4\omega_0^2 C_1^2 R_C^2 + 1)}{R_C^2 + \omega_0^2 L^2 + \omega_0^4 L^2 C_1^2 R_C^2 - 2\omega_0^2 L C_1 R_C^2}} \quad (5)$$

结合电路参数实际取值范围,可以得出 Q_L 是 C_1 的单调递增函数,即 C_1 越大, Q_L 就越高。但是 C_1 过大有可能导致电路不满足振幅起振条件,不易产生振荡。所以应取 C_1 的最佳值,使得 Q_L 尽量高,在不影响电路起振的情况下尽可能地降低相位噪声。

3 120 MHz晶体振荡器的低相噪设计

根据上述分析,本文设计了一个120 MHz的晶

对于降低相位噪声是很有利的。

从振荡器频谱纯度的角度, Q_L 指数定义为^[8-9]:

$$Q_L = \frac{\omega}{2} \left| \frac{1}{z(\omega)} \frac{dz(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} = \frac{\omega}{2} \left| \frac{d}{d\omega} \ln z(\omega) \right|_{\omega=\omega_0} \quad (2)$$

但是晶体管振荡器中晶体管实质上是一个电流控制电流源,所以 Q_L 应被定义为:

$$Q_L = \frac{\omega}{2} \left| \frac{1}{z(\omega)} \frac{dz(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} = \frac{\omega}{2} \left| \frac{d}{d\omega} \ln \frac{z_{11}(\omega)}{z_{12}(\omega)} \right|_{\omega=\omega_0} \quad (3)$$

式中 $z_{11}(\omega)$ 和 $z_{12}(\omega)$ 是电路阻抗矩阵 \mathbf{Z} 中的元素。

2 皮尔斯振荡电路分析

根据前面低相噪分析,对皮尔斯振荡电路进行分析。如图2所示为皮尔斯等效电路^[3]。

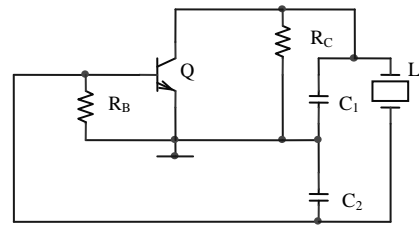


图2 皮尔斯等效电路

其中晶体谐振器相当于一个电感,假设谐振器的电抗为 $j\omega L$, 求得电路的 \mathbf{Z} 参数矩阵为^[9-10]:

体振荡器。由于实际条件所限,所选的晶体为中等质量的UM-1电阻焊AT切5次泛音晶体谐振器,其无载 Q 值约为10万,晶体的串联谐振频率偏高,大约为120.001 500 MHz。由于加感后,晶体的有载 Q 为^[11]:

$$Q_L = \frac{Q_0}{1 + \frac{R_l}{R(1 - \omega^2 L_l C_0)^2}} \quad (6)$$

式中 Q_0 为晶体的无载品质因数; L_l 为串联电感; R_l 为串联电感 L_l 的损耗电阻; R 为晶体的等效电阻; ω 为晶体的串联谐振频率; C_0 为并联电容。为此本文实验中没有加感。电源电压为+12 V,测量仪器为Agilent E5052B信号源分析仪。

图3为该120 MHz晶体振荡器的相位噪声测试结果。从图中可知其偏离载频为100 Hz、1 kHz,远端相位噪声分别达到了-126 dBc/Hz@100 Hz、-155 dBc/Hz@1 kHz和-175 dBc/Hz@100 kHz。

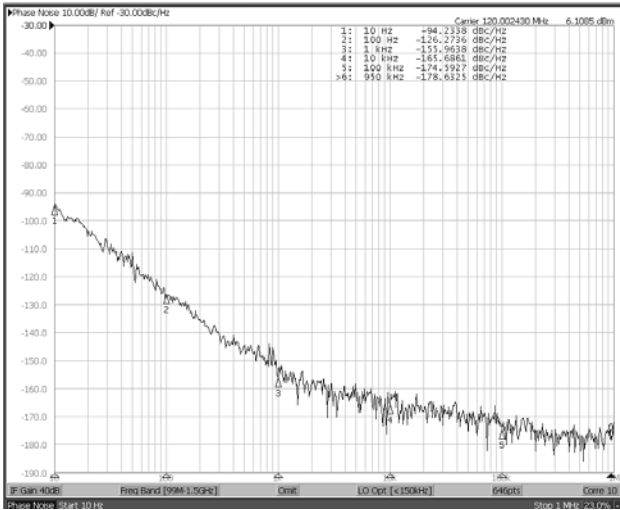


图3 120 MHz晶体振荡器相位噪声曲线图

为了提高 Q_L , 进一步调整 C_1 值, 测得调整后的晶体振荡器的相位噪声曲线如图4所示。

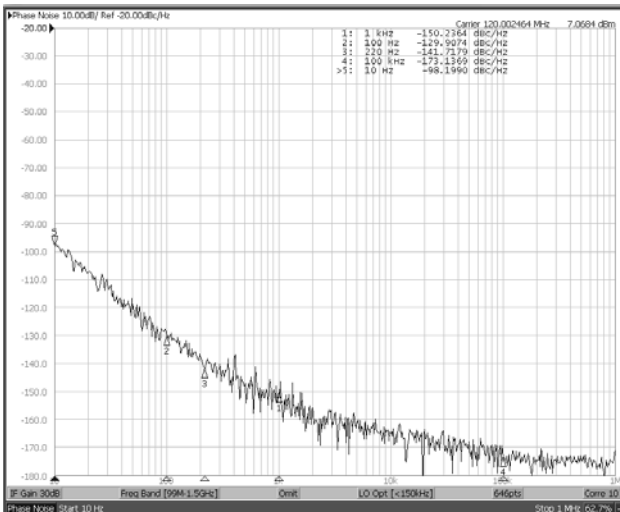


图4 调整 C_1 后的相位噪声曲线图

从图4可以看出, 晶体振荡器偏离载频10 Hz、100 Hz、220 Hz等处相位噪声指标均有所提高, 分别达到了-98 dBc/Hz@10 Hz、-130 dBc/Hz@100 Hz、-142 dBc/Hz@220 Hz。

4 结论

本文尝试以有载 Q 为基础进行低相噪晶体振荡器的设计, 以AT切120 MHz晶体振荡器为例给出了相位噪声的实际测量结果, 并通过调整 C_1 使得近旁相位噪声指标进一步提高。结果表明, 从有载 Q 出发对低相噪晶体振荡器进行设计是可行的。

参考文献

[1] LEESON D B. A simple model of feedback oscillator noises spectrum[J]. Proc IEEE, 1966, 54(2): 329-330.

[2] SAUVAGE G. Phase noise in oscillator: A mathematical analysis of Leeson model[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 1977, 12(4): 408-410.

[3] 白居易. 低噪声频率合成[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994: 40-42.

BAI Ju-xian. Low-noise frequency synthesis[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1994: 40-42.

[4] GALLIOU S, STHAL F, MOUREY M. New phase noise model for crystal oscillators application to the Clapp oscillator[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2003, 50(11): 1422-1428.

[5] GALLIOU S, STHAL F, MOUREY M. Enhanced phase noise model for quartz crystal oscillators[C]//Proc Annu IEEE Int Freq Control Symp. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2002: 627-632.

[6] NALLATAMBY J C, PRIGENT M, CAMIADE M, et al. Extension of the Leeson formula to phase noise calculation in transistor oscillators with complex tanks[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2003, 51(3): 690-696

[7] NALLATAMBY J C, PRIGENT M, CAMIADE M, et al. Phase noise in oscillators Leeson formula revisited[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2003, 51(4): 1386-1394.

[8] OHIRA T. Rigorous Q -factor formulation for one- and two-port passive linear networks from an oscillator noise spectrum viewpoint[J]. IEEE Trans Circuits Syst Express Briefs, 2005, 52(12): 846-850.

[9] Huang Xian-he, Tan Feng, Wei Wei, et al. A Revisit to phase noise model of leeson[C]//IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum, Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 238-241.

[10] 胡宴如, 耿苏燕. 高频电子线路[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 103-107.

HU Yan-ru, GENG Su-yan. High frequency electronic circuit[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 103-107.

[11] Huang Xian-he, Tan Feng, Dai Peng, et al. Microcontroller compensated overtone TCXO with low phase noise characteristic[C]//IEEE Int Freq Control Symp, Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008: 829-832.

编辑 张俊



黄显核, 教授, 博士生导师。现为省电子学会理事、四川省声学学会副理事长等。主要研究方向为时频检测与控制技术。近5年来在IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control等刊物和国际会议上发表SCI、EI检索论文30余篇次。