

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.05.018

宇航用小型化超稳晶振(USO)设计与实现

杨磊

(中国空间技术研究院西安分院,西安 710000)

摘要:在分析高稳定晶体振荡器(OCXO)工作原理的基础上,提出了一种改善晶体振荡器相位噪声的方法。通过低噪声主振电路设计、高精度控温电路设计及机电一体化设计等措施,设计研制了一种宇航用小型化超稳定晶体振荡器(USO),尺寸为99mm×88mm×55mm。经测试,产品短期频率稳定度为 $2.11 \times 10^{-13}/1s$ 、 $3.28 \times 10^{-13}/10s$ 、 $8.61 \times 10^{-13}/100s$ (Allan方差),相位噪声为 $-129.4\text{dBc}/\text{Hz}@1\text{Hz}$ 和 $-147.0\text{dBc}/\text{Hz}@10\text{Hz}$ 。

关键词:高稳定晶体振荡器(OCXO);超稳定晶体振荡器(USO);短期频率稳定度;相位噪声
中图分类号:TN75 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-8110(2021)05-0133-06

Development of Miniaturized Ultra-stable Oscillator for Aerospace Application

YANG Lei

(China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710000, China)

Abstract: Based on the principle of OCXO, a method to reduce the phase noise is proposed. With the low phase noise oscillation circuit design, high precision temperature control circuit design, and mechanical and electrical integration, we develop a miniaturized ultra-stable oscillator (USO) for aerospace application. The size of the USO is 99mm×88mm×55mm. Through tests of the product, the short-term stabilities of the USO have reached $2.11 \times 10^{-13}/1s$, $3.28 \times 10^{-13}/10s$, and $8.61 \times 10^{-13}/100s$, and the phase noise are $-129.4\text{dBc}/\text{Hz}@1\text{Hz}$ and $-147.0\text{dBc}/\text{Hz}@10\text{Hz}$.

Key words: OCXO; USO; Short-term stability; Phase noise

0 引言

高稳晶振(Oven Controlled Crystal Oscillator, OCXO)广泛应用于电子、通信、导航、航空航天等诸多领域,超稳晶体振荡器(Ultra-Stable Oscillator, USO)是短期稳定度和相位噪声最高的恒温振荡器类产品,凭借其优异的性能、小体积和高可靠性,进一步拓宽了其在空间精密测量和深空通信等领域的应用^[1]。由于自身和外界因素,振荡器的输出频率不可能恒定不变,即便是非常微小的变化,对某些系统的性能影响

也不可忽视。空间科学的发展对振荡器输出频率的稳定度提出了越来越高的要求。美国、法国和瑞士开展这方面研究较早,居于领先地位。目前,美国应用于GRAIL月球探测器的星载超稳晶振的短期频率稳定度指标优于 $2 \times 10^{-13}/s$,代表了星载超稳晶振研制的最高水平。随着目前空间测量及时频应用领域的不断扩展^[1-3],更高稳定度的超稳晶振需求不断增加^[4-6]。本文在前期开展样机研制的基础上,在不降低性能指标的同时,优化了恒温槽设计,与样机产品相比,大幅缩小了产品的体积,设计实现了尺寸为

收稿日期:2020-12-09;修订日期:2021-02-18

基金项目:2020年国家重点实验室基金(6142411196307)

作者简介:杨磊(1986-),男,硕士,高级工程师,主要从事频率源、空间微波技术方面的研究。

99mm×88mm×55mm 的宇航用小型化 USO。经测试,产品短期频率稳定度为 $2.11 \times 10^{-13}/1\text{s}$ 、 $3.28 \times 10^{-13}/10\text{s}$ 、 $8.61 \times 10^{-13}/100\text{s}$ (Allan 方差),相位噪声为 $-129.4\text{dBc}/\text{Hz}@1\text{Hz}$ 和 $-147.0\text{dBc}/\text{Hz}@10\text{Hz}$ 。

1 振荡器相位噪声

现有的相位噪声数学研究方法主要有 Leeson 噪声模型^[7]和线性时不变方法等。Leeson 噪声模型是关于反馈振荡器的简单噪声模型,与实际测试实验具有良好的符合性,因此被广泛应用于振荡器噪声的分析。

振荡器是由放大器和反馈网络组合构成,噪声引起振荡器输出信号的频率(相位)随机起伏,起伏越小的振荡器其相位噪声就越好。

振荡器的 Leeson 模型输出相位噪声表示如下

$$S_{\varphi_0}(f) = S_{\varphi_A}(f) \left[1 + \left(\frac{f_0}{2Qf} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中, $S_{\varphi_0}(f)$ 为振荡器输出端相位噪声谱密度; $S_{\varphi_A}(f)$ 为振荡器环路内部相位谱密度; f_0 为振荡器输出频率; Q 为回路品质因数。

设放大器中只存在闪变噪声 ($1/f$ 噪声) 和白噪声,则总的振荡器输入相位功率谱密度可表示为

$$S_{\Delta\varphi}(f) = \alpha f^{-1} + \beta \quad (2)$$

其中, α 为取决于 $1/f$ 噪声电平的常数; $\beta = 2FkT/P_s$, 其中 F 为噪声系数, P_s 为振荡器输入的信号功率。

将式(2)代入式(1)得

$$S_{\Delta\varphi}(f) = \alpha_k f^{-3} + \beta_k f^{-2} + \alpha f^{-1} + \beta \quad (3)$$

其中, $k = (f_0/2Q)^2$; α_k 为与闪频噪声有关的系数; β_k 为与白频噪声有关的系数; α 为与闪相噪声有关的系数; β 为与白相噪声有关的系数。

主振电路与放大电路对超稳晶振的噪声影响最大,这是本文研究的重点内容。电路的相位噪声 $S_{\varphi}(f)$ 为主振电路的相位噪声 $S_{\varphi_1}(f)$ 与放大电路的相位噪声 $S_{\varphi_2}(f)$ 相加。

根据 Leeson 模型,主振电路相位噪声 $S_{\varphi_1}(f)$ 为^[8]

$$S_{\varphi_1}(f) = (2G_1KF_1T/P_{S1} + 2\alpha_1/f) [1 + (f_c/2Q_c f)^2] \quad (4)$$

其中, P_{S1} 为主振输出信号功率; F_1 为主振噪声系数; G_1 为主振功率增益; K 为波兹曼常数; T 为绝对温度; α_1 为主振 $1/f$ 噪声系数; Q_c 为晶体有载 Q 值; Q_l 为晶体有效 Q 值。

放大电路相位噪声 $S_{\varphi_2}(f)$ 为

$$S_{\varphi_2}(f) = 2G_2KF_2T/P_{S2} + 2\alpha_2/f \quad (5)$$

其中, P_{S2} 为放大电路输出信号功率; F_2 为放大电路噪声系数; G_2 为放大电路功率增益; K 为波兹曼常数; T 为绝对温度; α_2 为放大电路 $1/f$ 噪声系数。

当然,除主振电路和放大电路外,在实际电路中,滤波电路和恒温槽等对相位噪声也有一定影响^[9],在设计中也需进行考虑。

相位噪声是频率稳定度的频域表征,是噪声信号调制的单边带(Single Side Band, SSB)功率和载波功率之比

$$L(f) = \frac{\text{频偏 } f \text{ 处 } 1\text{Hz} \text{ 单边带功率谱}}{\text{载波功率}} \quad (6)$$

$L(f)$ 称为单边带相位噪声,并且当 $|\varphi(t)| \ll 2\pi f_0$ 时

$$S_{\varphi}(f) \approx 2L(f) \quad (7)$$

2 低噪声电路设计

研究表明,晶体振荡电路的噪声主要由主振及放大电路贡献,因此主振及放大电路是超稳晶振低噪声设计的重点。

2.1 振荡电路设计

主振电路选用皮尔斯电路形式,该电路具有良好的频率稳定性^[10],是低噪声振荡器应用最广泛的电路之一,如图 1 所示。在主振电路的低噪声设计中采取了以下措施:

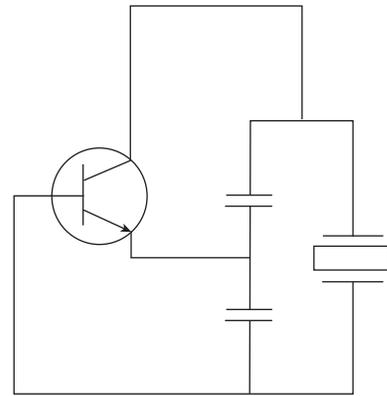


图 1 皮尔斯电路等效图

Fig. 1 Pierce circuit equivalent diagram

1) 理论分析表明,对秒级稳定度影响较大的是闪频噪声^[10]。改善秒级稳定度的措施之一是尽量降低晶体管集电极电流,该特性由晶体管自身特性所决定。合适的晶体及晶体管可实现较小的集电

极电流,同时保证主振电路工作正常。

2)石英晶体谐振器频率的相对变化与晶体电流的关系可以近似用式(8)表示^[10]

$$\frac{\Delta f}{f} = D \cdot i^2 \quad (8)$$

其中: D 为晶体电流常数,对于5MHz晶体, $D \approx 0.5 \sim 1/A^2$; i 为流过晶体的交流电流。

由式(8)可知,晶体的激励电平较大时,对频率稳定度的影响较大。同时由于噪声的限制,激励电平也不能取得太小,否则会使短期稳定度变差。因此,要有良好的频率稳定度就必须将晶体激励电平控制在合适的范围内,本文选取的激励电平约为 $100\mu\text{A}$ 。

3)选择噪声系数低、电流放大倍数较高、截止频率高的高频低噪晶体三极管。晶体管的噪声主要有白噪声和闪烁噪声,应选用 r_{bb} 小、 C_{bc} 小的晶体管^[9],同时放大倍数不宜过高,否则容易降低振荡电路的频率稳定性,通常电流放大倍数大于80即可^[10-11]。主振电路选用的晶体管为国产3DG142C高频低噪声晶体管,其截止频率为800MHz,噪声系数为2.5dB。

4)选用高 Q 值晶体谐振器,并提高电路有载 Q_c 值。由于 $1/f$ 噪声电平大致与晶体谐振器 Q 值成反比,选用高 Q 值晶体谐振器对提高振荡电路秒级稳定度非常有利^[9],最终选用了SC切TO封装冷压焊5MHz晶体谐振器, Q 值约为2400k,同时必须在电路设计及调试中使振荡电路工作在最佳负载阻抗附近,尽可能地提高有载 Q_c 值,才能充分发挥晶体高 Q 值特性。

5)在主振电路晶体管射级增加交流反馈电阻 R_f ,可减小发射结电容及晶体管电流因 $1/f$ 噪声引起的起伏,改善主振电路的近端噪声;也可减小因电源电压和环境温度变化所引起的晶体管电流的变化^[10],一般 R_f 取值在 $20 \sim 40\Omega$ 效果较好。

2.2 辅助电路设计

辅助电路主要包括电源滤波电路、放大电路和滤波匹配电路三部分,合理选择辅助电路形式及参数,可以提高输出信号的质量。电源滤波电路主要通过二次稳压,各级电路电源入端就近滤波,使干扰噪声信号就近滤除到地线端以平滑噪声,降低电源波动引起的干扰。

放大电路是振荡电路低噪声设计的重点环节,传统的恒温晶振设计通常会设置自动增益控制电

路和射极跟随器电路,有利于提高电路稳定性,易于起振,提高隔离效果;但自动增益控制电路和射极跟随器电路容易引入噪声,而且晶体管的增加对降低电路噪声也是不利的,因此本次设计未使用自动增益控制电路和射极跟随器电路。在放大电路设计上采取了如下降低噪声的措施:

1)采用阻容耦合结合的方式实现级间匹配,确定合理的工作点,尽可能使放大电路处于线性工作区,降低电路噪声。在放大电路设计中采用两级放大电路,第一级放大电路处于线性工作区,第二级放大电路处于浅饱和状态,起到放大兼隔离作用。

2)根据放大器拐角频率 f_c 和振荡电路转折频率 $f_o/2Q$ 的关系,优化振荡电路的调试参数,采取适当的交、直流负反馈降低电路 $1/f$ 噪声,达到改善近端相位噪声的目的。

3 精密控温系统设计

控温电路与恒温槽共同构成了控温系统,高精度的控温系统不仅可以提升短期稳定度,还能改善近端相位噪声。对于达到 10^{-13} 量级短期稳定度的超稳晶振,环境温度的波动会引起产品频率的变化,效果如同 $1/f$ 噪声对频率的调制一样,使恒温晶振的近端相位噪声变差^[10,12]。传统的单层恒温设计难以满足要求,采取双层恒温设计方案并设置合理的内外层控温偏置温度,进一步改善近端相位噪声。

内、外两层恒温槽控温电路均选用直接放大连续式控温电路,直接放大连续式控温电路工作于直流状态,受外界干扰小,电路简单,易于小型化设计。在采用稳定可靠控温电路的同时,合理的控温结构设计同样至关重要。在双层恒温槽结构中,内层和外层所用的温度控制电路一般形式相同,但内层和外层恒温槽的热学结构却不同。外层恒温槽体积较大,要保持恒温控制比较困难,一般对于环境温度变化的改善比较有限。外层的缩减因子^[10]一般在0.1左右,内槽的缩减因子大约为0.02,两层同时工作时的缩减因子理论上为0.002。实际试验时测试缩减因子小于该值,由于内外两层恒温槽结构间非完全热隔离,之间会有热耦合而相互影响^[13]。

内层恒温槽布局时,主要将主振电路放置在内层恒温槽,以保证电路中对温度敏感的晶体及晶体管状态基本保持恒定。同时,恒温槽结构设计时采用导热系数高、热容值较大的材料,以保证在大热

容的同时提高晶体温度分布的均匀性。外层控温主要用来隔离环境温度和内层恒温槽温度之间的变化,进一步降低环境温度影响。

4 小型化设计

小型化设计在宇航应用中有诸多便利之处。本设计在电路设计时,在全部采用国产化元器件的基础上,尽量考虑小型化如表贴封装的电阻和电容等器件,同时简化不必要电路,并在电路布局布线上提高密度,减小 PCB 布线及连接等寄生效应引起的等效杂散电容,提高超稳晶振产品的设计健壮性,避免晶振进入非正常工作模式或引起起振不正常等问题。

宇航应用中主要考虑产品的空间环境适应性,除了适应力热环境外,还需考虑空间辐照环境,因此设计中优先选用抗辐照等级高的元器件,在结构设计和材料选择上,选用抗空间辐照能力强的材料。同时整机设计中通过局部钽皮加固,提高了产品的抗辐照能力。小型化设计中一项重要的措施是去掉了金属隔热装置,简化了恒温槽设计,在不明显降低性能指标的同时,与样机产品相比,大大缩小了产品的体积,使产品最终由尺寸 140mm×140mm×200mm,质量 800g(图 4(a))减小至尺寸 99mm×88mm×55mm,质量 300g(图 4(b)),实现了小型化设计,原理框图如图 2 所示。

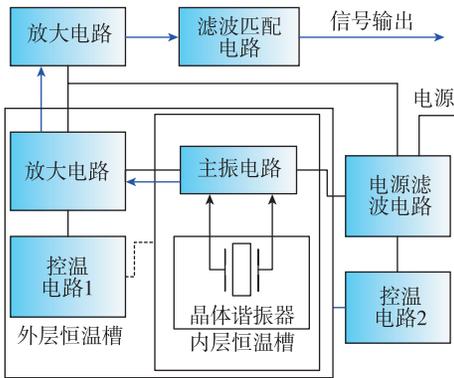


图 2 超稳晶振设计框图

Fig. 2 Ultra-stable oscillator design

5 测试结果分析

根据上述分析,选择皮尔斯形式的电路作为 5MHz 振荡电路,利用 ADS 软件进行仿真分析。对电路的近端相位噪声进行仿真及参数优化,仿真结果如图 3 所示。振荡电路输出 5MHz 正弦信号,其

相位噪声为 $-125.0\text{dBc}/\text{Hz}@1\text{Hz}$ 和 $-141.5\text{dBc}/\text{Hz}@10\text{Hz}$ 。

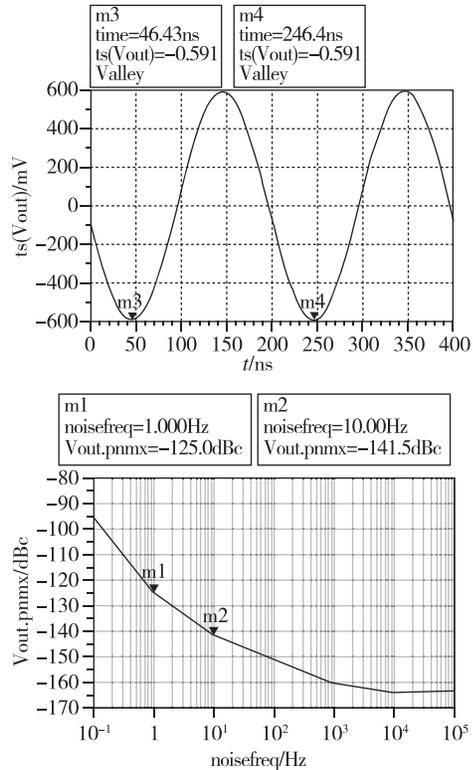
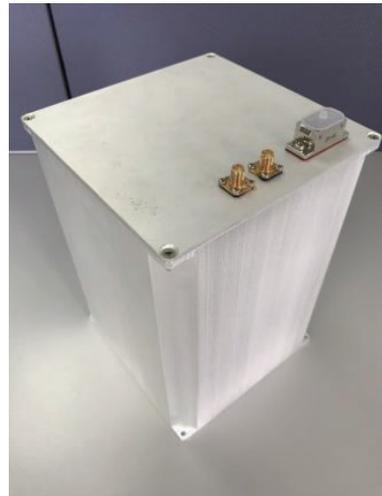


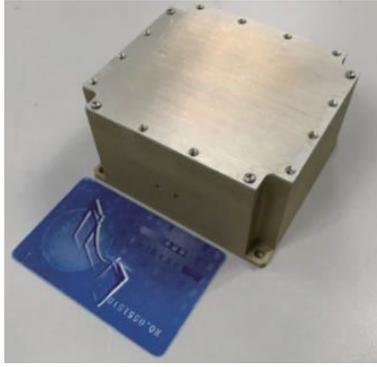
图 3 5MHz 振荡电路仿真

Fig. 3 5MHz oscillation circuit simulation

基于上述分析,设计研制的小型化 USO 产品实物如图 4(b)所示,体积较原工程样机(如图 4(a))体积大幅减小。利用 TSC5120(含内置源)进行测试,结果如图 5 所示,产品短期频率稳定度为 $1.86 \times 10^{-13}/0.4\text{s}$ 、 $2.11 \times 10^{-13}/1\text{s}$ 、 $3.28 \times 10^{-13}/10\text{s}$ 、 $8.61 \times$



(a) 140mm×140mm×200mm



(b)99mm×88mm×55mm

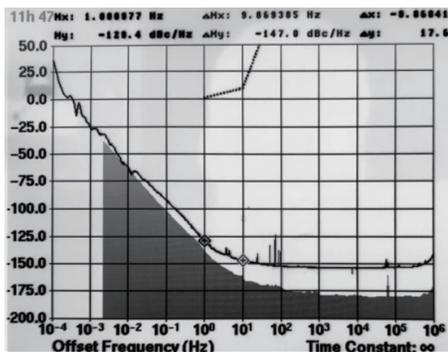
图 4 超稳晶振实物图

Fig. 4 Pictures of the USOs

$10^{-13}/100s$, 相位噪声为 $-129.4dBc/Hz@1Hz$ 和 $-147.0dBc/Hz@10Hz$ 。与样机指标(短期稳定度为 $3.29 \times 10^{-13}/1s$ 和 $1.68 \times 10^{-13}/10s$, 相位噪声为 $-121.6dBc/Hz@1Hz$ 和 $-133.8dBc/Hz@10Hz$) 相比, 小型化产品 1s 级稳定度稍有提升, 10s 级稳定度

Avg. Time (s)	Allan Deviation $\sigma_y(\tau)$	Noise Floor
0.001	3.9612×10^{-11}	3.29749×10^{-12}
0.002	2.11404×10^{-11}	2.01841×10^{-12}
0.004	1.36919×10^{-11}	1.48938×10^{-12}
0.01	5.3426×10^{-12}	5.94701×10^{-13}
0.02	3.3195×10^{-12}	2.33929×10^{-13}
0.04	1.1342×10^{-12}	1.17190×10^{-13}
0.1	5.150×10^{-13}	6.54858×10^{-14}
0.2	3.364×10^{-13}	5.31614×10^{-14}
0.4	1.864×10^{-13}	5.98941×10^{-14}
1	2.117×10^{-13}	7.62813×10^{-14}
2	2.584×10^{-13}	9.20721×10^{-14}
4	2.899×10^{-13}	1.17561×10^{-13}
10	3.283×10^{-13}	1.65207×10^{-13}
20	3.70×10^{-13}	2.23332×10^{-13}
40	4.88×10^{-13}	3.17103×10^{-13}
100	8.61×10^{-13}	4.93248×10^{-13}
200	1.29×10^{-12}	5.80726×10^{-13}

(a) 短期稳定度



(b) 相位噪声

图 5 5MHz 超稳晶振测试结果

Fig. 5 Test results of 5MHz USO

稍有降低; 对于相位噪声, 小型化产品整体较样机提升明显。

受限于 TSC5120 内置源的近端相位噪声限制, 最终选取了 2 台性能相近的参考源 1# 和 2# 与研制的 USO 产品 3# 进行两两互测, 规定 2 台参考源的相位噪声为 $L_1(f)$ 和 $L_2(f)$, 研制的 USO 的相位噪声为 $L_3(f)$, 则 $L_{12}(f)$ 为 2 个参考源互测结果, $L_{13}(f)$ 为参考源 1# 与研制产品互测结果, $L_{23}(f)$ 为参考源 2# 与研制产品互测结果。三源循环比对测量方法中尽量保证测试时间和环境等的一致性。

根据三源循环比对测量方法, 可按式(9)~式(11)计算各频率源相位噪声测试指标

$$L_1(f) = 10 \lg \left(\frac{1}{2} \left(\exp \frac{L_{12}(f)}{10} + \exp \frac{L_{13}(f)}{10} - \exp \frac{L_{23}(f)}{10} \right) \right) \quad (9)$$

$$L_2(f) = 10 \lg \left(\frac{1}{2} \left(\exp \frac{L_{12}(f)}{10} + \exp \frac{L_{23}(f)}{10} - \exp \frac{L_{13}(f)}{10} \right) \right) \quad (10)$$

$$L_3(f) = 10 \lg \left(\frac{1}{2} \left(\exp \frac{L_{13}(f)}{10} + \exp \frac{L_{23}(f)}{10} - \exp \frac{L_{12}(f)}{10} \right) \right) \quad (11)$$

测试数据如表 1 所示, 经过计算, 研制的 USO 产品相位噪声为 $-130.4dBc/Hz@1Hz$ 和 $-147.2dBc/Hz@10Hz$, 100Hz~100kHz 相位噪声指标受限于被测参考源。同时, 在不进行测试数据修正的情况下, 研制的 USO 用 TSC5120 内置源测试 1Hz 相位噪声受限, 10Hz~100kHz 相位噪声测试较为准确^[14]。

表 1 三源循环比对测试结果

Tab. 1 Test results of three-source cycle comparison

相位噪声/ (dBc/Hz)	$L_{12}(f)$	$L_{13}(f)$	$L_{23}(f)$	$L_1(f)$	$L_2(f)$	$L_3(f)$
1Hz	-129.4	-128.2	-128.4	-132.1	-132.6	-130.4
10Hz	-144.8	-144.3	-144.7	-147.4	-148.2	-147.2
100Hz	-148.7	-149.1	-149.1	-151.7	-151.7	-152.5
1kHz	-149.3	-150.0	-150.0	-152.3	-152.3	-153.8
10kHz	-149.7	-150.1	-150.1	-152.7	-152.7	-153.5
100kHz	-150.5	-150.6	-150.6	-153.5	-153.5	-153.7

6 结论

本文主要从低噪声电路设计、高精度控温电

路、小型化等方面开展了国产宇航用小型化超稳定晶体振荡器设计研制。通过对产品进行仿真分析及实测,在相位噪声及短期稳定度指标上取得了较好的结果,达到了国内领先水平,具有较高的宇航应用价值。当然,超稳晶振产品仍有提升空间,可从以下方面开展工作:1)小型化后续可以考虑从电路集成化方面进一步提升;2)进一步优化电路设计,提高控温性能,开展测试及研究,秒级稳定度可优于 1.5×10^{-13} 。

参考文献

- [1] Shapira A, Stern A. An ultra stable oscillator for the 3GM experiment of the JUICE mission[C]// Proceedings of European Frequency & Time Forum (EFTF), 2016: 132-136.
- [2] Apte A M, Poddar A K, Rohde U L, et al. Colpitts oscillator: a new criterion of energy saving for high performance signal sources[C]// Proceedings of International Frequency Control Symposium (IFCS). IEEE, 2016: 70-76.
- [3] Calosso C E, Vernotte F, Giordano V, et al. Frequency stability measurement of cryogenic sapphire oscillators with a multichannel tracking DDS and the two-sample covariance[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2019, 66(3): 616-623.
- [4] Giordano V, Grop S, Fluhr C, et al. The autonomous cryocooled sapphire oscillator: a reference for frequency stability and phase noise measurements[C]// Proceedings of 8th Symposium on Frequency Standards and Metrology, 2015.
- [5] Yasuda T, Senanayaka S S, Uchino K, et al. Nonlinear model of crystal resonator and its application to phase noise simulator of oscillator[C]// Proceedings of International Frequency Control Symposium (FCS). IEEE, 2014: 1-3.
- [6] Lee Y T, Lee J, Nam S. High-Q active resonators using amplifiers and their applications to low-phase noise freerunning and voltage-controlled oscillators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2004, 52(2): 2621-2626.
- [7] Leeson D B. A simple model of feedback oscillator noise spectrum[J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(2): 329-330.
- [8] 荆震. 高稳定晶体振荡器(第一版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1975: 90.
Jing Zhen. High stability crystal oscillator (1st edition) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1975: 90(in Chinese).
- [9] 韩金瑞, 黄显核. 振荡器相位噪声的 ADS 仿真优化[J]. 声学技术, 2011, 30(4): 397-400.
Han Jinrui, Huang Xianhe. ADS simulation optimization of oscillator phase noise[J]. Acoustic Technology, 2011, 30(4): 397-400(in Chinese).
- [10] 赵声衡, 赵英. 晶体振荡器(第一版)[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 208-218.
Zhao Shengheng, Zhao Ying. Crystal oscillator(1st edition) [M]. Beijing: Science Press, 2008: 208-218 (in Chinese).
- [11] 秦玉浩, 蒋韦, 贺玉玲, 等. 小型高稳定度 10MHz 恒温晶振的研制[C]// 全国时间频率学术会议, 2011: 188-189.
Qin Yuhao, Jiang Wei, He Yuling, et al. Development of 10MHz high stability mini-OCXO[C]// Proceedings of China Time and Frequency Symposium, 2011: 188-189(in Chinese).
- [12] 刘利辉, 曾健平, 张智. 100 MHz 低噪声恒温石英晶体振荡器研制[J]. 湖南大学学报, 2009, 36(4): 53-56.
Liu Lihui, Zeng Jianping, Zhang Zhi. Research and development of a 100 MHz low noise constant temperature crystal oscillator[J]. Journal of Hunan University, 2009, 36(4): 53-56(in Chinese).
- [13] Asamura F, Oita T, Obara S, et al. Temperature coefficients improvements of VHF oscillator circuit for OCXO[C]// Proceedings of IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum. IEEE, 2007: 230-233.
- [14] Salzenstein P. Frequency stability measurements of ultrastable BVA resonators and oscillators[J]. Electronics Letters, 2010, 46(10): 686-688.

(编辑:孟彬)