

引用格式：闫建成, 蒋松涛, 吴海钧, 等. 小型化宽温高精度温补晶振的设计与实现[J]. 时间频率学报, 2024, 47(1): 18-25.

小型化宽温高精度温补晶振的设计与实现

闫建成, 蒋松涛, 吴海钧, 李陈

成都天奥电子股份有限公司, 成都 610015

摘要: 介绍了一种小型化宽温高精度温补晶振的设计方案及其补偿的实现。该设计的核心是采用专用温补芯片和分立结构实现产品的小型化和低功耗, 并避免环境温度对补偿精度的干扰, 保证温补晶振宽温高精度的实现。通过这种补偿方法研制的 10 MHz 温补晶振, 在 $-55\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内频率温度稳定度优于 $\pm 0.28 \times 10^{-6}$, 相位噪声优于 -150 dBc/Hz @ 1 kHz。测试结果表明, 该温补晶振具有体积小, 工作温度范围宽, 功耗低和相位噪声特性良好等特点。同时该产品可靠性高, 适合批量化生产, 可广泛用于军民测控通讯类设备中。

关键词: 温补晶振; 小体积; 低相位噪声

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2024-01-0018-08

Design of a miniature temperature compensated crystal oscillator with high precision in wide temperature range

YAN Jian-cheng, JIANG Song-tao, WU Hai-jun, LI Chen

Chengdu Spaceon Electronics Company Limited, Chengdu 610015, China

Abstract: This paper introduces the design scheme of a miniaturized wide temperature high-precision temperature compensated crystal oscillator (TCXO) and its implementation of compensation. The core of the design is to use a special temperature compensation chip and the separate structure to achieve miniaturization and low power consumption of the product, avoiding the interference of ambient temperature on the compensation accuracy, to ensure the realization of TCXO wide temperature range and high precision. The 10 MHz temperature-compensated crystal developed by this compensation method has a frequency temperature stability better than $\pm 0.28 \times 10^{-6}$ over the range of $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, and a phase noise better than -150 dBc/Hz @ 1 kHz. The test results show that the TCXO has the characteristics of small size, wide operating temperature range, low power consumption and low phase noise characteristics. At the same time, the product has high reliability, suitable for mass production, and can be widely used in military and civilian fields, such as measurement and control communication devices.

Key words: temperature compensated crystal oscillator (TCXO); miniature; low phase noise

收稿日期: 2022-05-25; 接受日期: 2022-06-27

基金项目: 成都天奥电子股份有限公司技术创新基金 (PZT200601)

晶体振荡器常被用作频率或时间的基准源，在现代电子设备中有着举足轻重的作用^[1]。晶体振荡器分为恒温晶体振荡器、温度补偿晶体振荡器、压控晶体振荡器、恒温压控晶体振荡器和普通晶体振荡器等几大类。温度补偿晶体振荡器是除恒温晶体振荡器外的第二大类晶体振荡器^[2]。它具有体积小、重量轻、功耗小、开机特性快等特点，其温度频率特性和频率稳定度指标介于恒温晶振和普通晶振之间，使其广泛应用于通信、导航、程控交换机、航空航天、通用仪器等民用、军用电子设备中^[3-4]。因此，国内外对温度补偿晶体振荡器的研制和生产都十分重视。

近十年，虽然我国温度补偿晶体振荡器的技术水平发展速度非常快，但由于我国的芯片技术水平与国外发达国家存在一定的差距，不能为温度补偿晶体振荡器提供性能优良的电子芯片，造成我国温度补偿晶体振荡器的体积、重量和功耗都偏大。此外，由于我国表面贴装技术的研制与生产技术刚刚起步，表面贴装技术尚未广泛应用于温度补偿晶体振荡器。当这一技术应用于温度补偿晶体振荡器后，产品的体积、重量和功耗将进一步减小，并且工作稳定性和可靠性将进一步提高^[5]。

作为国内最先开展晶体器件的研究单位，成都天奥电子股份有限公司多年来不断对技术进行沉淀，同时积极钻研，通过不断创新，设计出了一种表面贴装温补晶振。该温补晶振的体积、重量和功耗都很小，能够很好的满足当前军用电子的宽温高精度的要求。

1 设计方案

我们曾研制出一款基于数字方案的温补芯片，芯片集成温度传感器、AD (analog-to-digital) /DA (digital-to-analog)、MCU (micro controller unit) 和 VCXO (voltage controlled crystal oscillator)，输出频率为 10 ~ 38.4 MHz，温度稳定度指标仅优于 $\pm 1.0 \times 10^{-6}$ (-40 °C ~ 85 °C)，相位噪声指标也较差，1 kHz 处相位噪声仅为 -120 dBc/Hz (10 MHz)。由于数字温补晶振方案在一些关键性能参数上与

模拟温补晶振相比缺乏竞争力，所以数字温补晶振的研究成果并未转化成实际的产品^[6]。本文中，我们采用了基于间接模拟补偿方案的芯片，可通过串口配置 EEPROM (electrically erasable programmable read only memory) 以调修补偿参数以适应不同的晶体。该温补晶振输出频率覆盖 10 ~ 50 MHz，通过缓冲电路，温补晶振可输出方波和削峰正弦波，内置分频电路，通过设置寄存器参数对频率进行分频。采用了模拟补偿方案，以保证晶振有较好的补偿精度与相位噪声指标。

为适应军用电子元器件小型化、片式化的实际需求，我们采用陶瓷金属的封装形式，温补晶振内部电路均采用集成电路，同时定制专用陶瓷基座用以绑定使用的集成电路芯片。该设计方案可以确保产品的可靠性及满足结构尺寸要求，实现产品的小型化、片式设计。

1.1 电路设计方案

本文设计的温补晶体振荡器技术特点是：体积小、抗振性好、频率范围宽和稳定度高。由于该温补晶体振荡器采用 SMD7050 型封装形式，分立器件相关技术途径无法运用。因此传统的设计和工艺技术无法满足该产品的设计要求，必须开展新技术、新工艺的研究，才能实现本产品的技术要求。结合多年温补晶体振荡器的电路设计经验，我们拟采用如图 1 所示的电路设计方案。电路设计的总体方案由压控振荡电路和补偿电路组成，可以实现 10 ~ 50 MHz 频率输出。

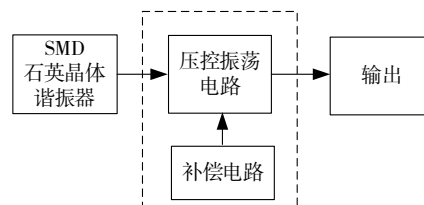


图 1 温补晶振的整体原理组成框图

由于该产品的结构为 SMD7050 封装，温度稳定度要求高，因此采用了集成压控振荡的温补芯片电路设计方案，实现微小集成化设计要求。采用了分立结构，避免了产品在补偿时由于环境温度对补偿精度的干扰，保证温补晶振宽温高精度的实现。其原理框图如图 2 所示。

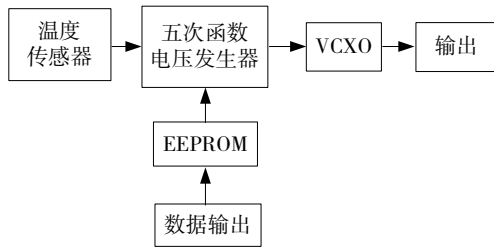


图 2 温补晶振电路组成框图

图 2 中，温补晶振电路包含 VCXO 电路、高精度补偿电路、温度传感器、电源管理和存储电路。VCXO 电路与晶体一起工作产生稳定度的振荡信号，VCXO 电路可以通过内部的电容阵列实现对频率的控制功能。温度传感电路监测当前的环境温度，产生电压信号，该电压信号再通过五次多项式函数电压发生电路得到当前温度下的补偿电压。这里得到的五次函数电压和 AT 切晶体谐振器的频率—温度特性具有相反的特性，它被用作温度补偿电压，补偿电压控制 VCXO 的输出频率，从而实现对晶振温度频差的补偿，使频率稳定在较高的精度内。EEPROM 电路用于存储每个温补晶体振荡器的频率温度特征曲线参数，用以控制多项式函数电压发生电路产生补偿电压，同时存储电路也可以对 VCXO 电路的参数进行设置。

AT 切石英晶体的温度特性可以用三阶函数很好地逼近，而采用五次函数可以更准确的拟合出晶体的曲线，该函数可以用式 (1) 表达^[7]：

$$\Delta f / f_0 = A_5(T - T_0)^5 + A_4(T - T_0)^4 + A_3(T - T_0)^3 + A_1(T - T_0) + A_0 \quad (1)$$

式(1)中： $\Delta f / f_0$ 是温度为 T 时的振荡频率； A_5 ， A_4 ， A_3 和 A_1 分别为五次项、四次项、三次项和一次项系数； T_0 为 AT 切晶体谐振器的拐点温度（此处的“拐点”指此五次函数二阶导数为零时的温度点，AT 切晶体谐振器近似为 25°C ）； A_0 为温度为 T_0 时的振荡频率^[8]。多项式系数主要由晶片切割时的切角决定，是由 AT 切晶体谐振器固有的值所决定的，因而是一个常量。由此看来，温补晶振的频率温度特性在很大程度上依赖于所用的晶体谐振器的特性。因此，如果此压控晶体振荡器 (VCXO) 的频率—控制电压特性是线性的，提供给用 AT 切

晶体谐振器的 VCXO，其频率—控制电压特性有很好的线性度。

产生五次补偿电压的五次函数发生器是实现高精度指标的关键模块，五次项曲线的电压产生电路的核心单元为基于多个带源极负反馈的差分放大器组合。单个放大器电路参见图 3，五次项电压发生器需 6 个差分放大器进行组合。

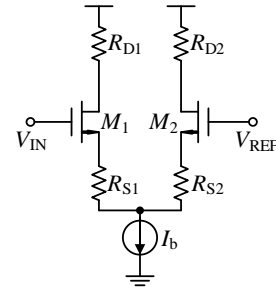


图 3 带源极负反馈的差分放大器

图 3 中，差分放大器的一个输入端接温度传感器输出，另一个输入端接参考电压。由于多项式曲线补偿电压发生电路包含多个运算放大器，因此在设计时需加入参数修调电路。通过开关控制的电容阵列可以用来改变电压求和电路各项输入的比例系数，从而达到较高的补偿精度。

1.2 结构和工艺设计方案

本文设计的温补晶振由陶瓷基座、温补芯片，3 个滤波电容和晶体谐振器组成，温补晶振的各组成部分在图 4 中标明。

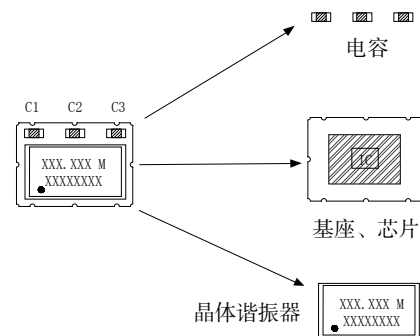


图 4 温补晶振各组成部分

温补芯片的焊盘通过金丝键合的方式与陶瓷基座上的键合点进行连接，温补芯片通过导电胶与陶瓷基座进行粘接，电容及晶体谐振器通过锡焊焊接的方式与基座进行连接。图 5 为该产品的解剖示意图。

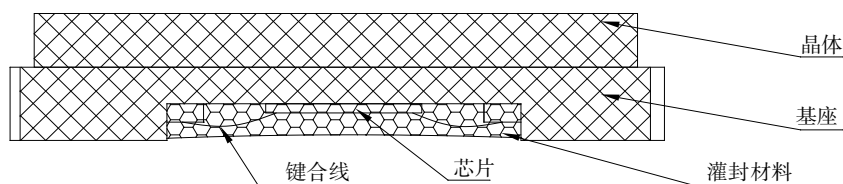


图 5 温补晶振解剖示意图

该产品为表面贴装温补晶振，产品外形尺寸为 7.0 mm × 5.0 mm × 2.0 mm。图 6 中，采用环氧树脂灌封的方式对基座内部的芯片、键合线、键合点进行灌封。使用灌封工艺是为了保障芯片、键合线、键合点不受外部环境污染，防止异物进入以及内部氧化等。

① 芯片的绑定及灌封工艺

如图 6 所示，IC 为温补晶振专用芯片。绑定线的金丝直径为 25 μm，采用球形焊工艺。绑定后使用环氧树脂胶（热膨胀系数 $19 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）对芯区进行灌封。

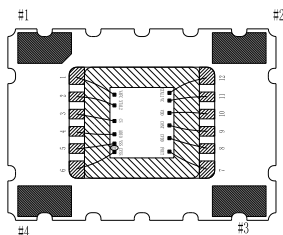


图 6 温补晶振内部绑定示意图

② 陶瓷基座的方案

由于氧化铝陶瓷具有良好的热冲击性能，机械强度较高和良好的气密性特性，我们采用陶瓷作为该温补晶振的基座。

该陶瓷基座为 5 层设计，总厚度为 1.0 mm。温补晶振使用的芯片粘接并键合在基座中部的凹槽内。

③ 测试夹具的方案

为了温补晶振的调试、测试，我们将选择与之匹配的测试夹具，夹具的型号为 CXP-E04-01-062。该夹具可以满足 SMD7050 封装晶振的测试以及部分环境试验测试。图 7 为我们选用的温补晶振夹具外形图。

1.3 高精度温度补偿技术

由于传统模拟补偿方式需要采用热敏电阻等

分离元器件，很难满足当今军用电子对小型化高精度的技术要求。因此本文采用全集成的温度补偿电路，在满足高精度的同时实现了小型化。

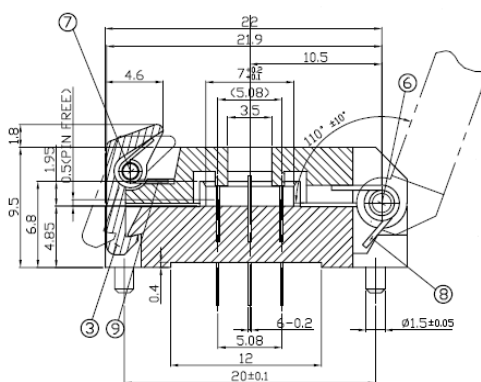


图 7 温补晶振夹具外形图

采用集成补偿电路的温补晶体振荡器与传统温补晶体振荡器在频率输出的补偿理念上有质的不同，加上其在温度传感和数据处理方法的改进，使得它具有很多传统温补晶体振荡器所不具备的优点。一般普通的模拟温补晶振采用由热敏电阻和若干电阻构成的网络，既作为温度传感器又作为补偿电压的产生电路。然而，由于热敏电阻不适合于集成，这样的温补晶体振荡器很难小型化。集成温度补偿电路是间接的模拟温度补偿方法，它包括一个不含热敏电阻的温度补偿电路，因此很容易集成从而实现温补晶体振荡器的小型化。另一方面，传统的模拟补偿一般要建立一个热敏电阻库，调整过程极其复杂，而数字温补晶体振荡器通过软件的方式对补偿电压进行调整，从而实现了对温补晶振输出频率的调整，使得温度补偿的操作过程变得较为简单，并且性能稳定可靠。而且正是由于采用了软件的方式实现了频率的自动调整，它可以达到更好的补偿精度。

通过软件对温补晶振进行温度补偿, 以及基准温度初始精度的修正, 通过温度循环后将温补晶振的输出频率进行自动运算, 得出最佳的函数

常数, 并将该常数写入集成补偿电路中, 可以得到设计要求的频率温度稳定度和准确度。其具体的操作过程见图 8。

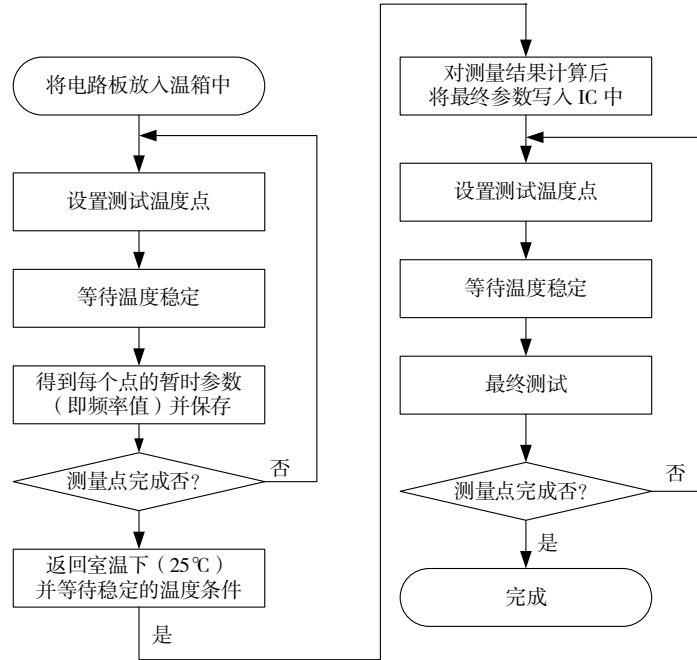


图 8 温度补偿流程图

由于补偿要求的精度较高, 对晶体谐振器的参数也要求较高。晶体谐振器的参数需要达到一致性, 才能有效的进行温补晶体振荡器的生产。

为进一步提高温补晶振的补偿精度以及产品的成品率, 该产品在研制中做了以下工作: 控制晶体谐振器的参数设计, 采用镀金工艺, 降低晶体谐振器的老化率, 使其尽量达到参数的一致性; 通过对温度补偿程序的进一步改进, 提高温补晶振的补偿精度。

2 实验结果与分析

2.1 主要电性能参数

图 9 为温补晶振 (10 MHz) 补偿前后的温度稳定度曲线对比图。三次曲线为补偿前的温频曲线图, 由于未进行补偿, 温补晶振的温频曲线主要由晶体谐振器温频特性决定, 为三次曲线^[9]。在 $-55\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 产品的温度稳定度指标仅能优于 $\pm 20 \times 10^{-6}$ 。通过补偿后, 温补晶振的温频

曲线接近一条直线, 稳定度指标优于 $\pm 0.19 \times 10^{-6}$, 产品补偿取得良好的效果。

表 1 和 2 列出了成功研制出 10 MHz 的温补晶振的常温和高低温数据。从两表中数据可见, 温补晶振的频率精度小于 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$, 在 $-55\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 产品的频率温度稳定度优于 $\pm 0.28 \times 10^{-6}$, 实测电流均小于 10 mA, 能够满足航空及航天对于电子产品高精度和低功耗的要求。

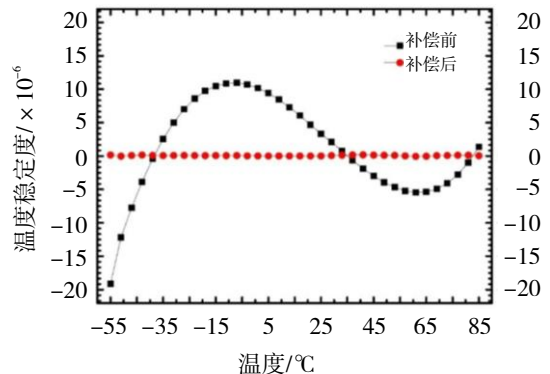


图 9 温补晶振补偿前后高低温数据图

表 1 10 MHz 温补晶振常温数据

编号	输入电流 功率/mA	基准频率 精度/ $\times 10^{-6}$	输出 波形	高电 平/V	低电 平/V	上升时 间/ns	下降时 间/ns	占空因素 /%
001	2.3	0.17	方波	3.27	-0.04	4.3	4.5	50.4
002	2.2	0.16	方波	3.27	-0.04	4.3	4.5	50.5
003	2.3	0.07	方波	3.27	-0.04	4.3	4.5	50.5
004	2.3	0.26	方波	3.27	-0.04	4.3	4.5	50.5
005	2.3	0.29	方波	3.27	-0.03	4.4	4.6	50.4
006	2.3	0.02	方波	3.27	-0.04	4.4	4.5	50.5
007	2.3	0.20	方波	3.27	-0.04	4.4	4.6	50.5
008	2.3	0.13	方波	3.27	-0.04	4.4	4.5	50.5
009	2.3	0.43	方波	3.26	-0.06	3.9	4.1	50.3
010	2.3	0.13	方波	3.27	-0.06	3.9	4.1	50.4
指标 要求	< 10	$\leq \pm 1$	方波	≥ 2.9	≤ 0.4	≤ 10	≤ 10	45 ~ 55

表 2 10 MHz 温补晶振高低温数据

编号	-55 °C	-45 °C	-35 °C	-25 °C	-15 °C	-5 °C	5 °C	15 °C	频率温度稳 定度/ $\times 10^{-6}$
001	0.44	0.28	0.26	0.23	0.23	0.25	0.25	0.22	± 0.13
002	0.53	0.24	0.17	0.19	0.15	0.19	0.20	0.19	± 0.19
003	0.20	0.02	0.05	0.10	0.09	0.11	0.12	0.13	± 0.09
004	0.38	0.21	0.24	0.27	0.28	0.28	0.29	0.28	± 0.09
005	0.52	0.27	0.27	0.30	0.30	0.32	0.32	0.30	± 0.13
006	-0.07	-0.01	0.02	0.04	0.01	0.03	0.02	0.04	± 0.08
007	0.51	0.27	0.19	0.21	0.23	0.28	0.30	0.28	± 0.17
008	0.17	0.08	0.14	0.15	0.12	0.15	0.18	0.18	± 0.05
009	0.65	0.44	0.47	0.48	0.47	0.49	0.49	0.46	± 0.12
010	0.38	0.07	0.13	0.16	0.13	0.16	0.17	0.19	± 0.16

编号	25 °C	35 °C	45 °C	55 °C	65 °C	75 °C	85 °C	频率温度稳 定度/ $\times 10^{-6}$
001	0.17	0.20	0.21	0.23	0.20	0.20	0.27	± 0.13
002	0.16	0.19	0.19	0.20	0.18	0.20	0.19	± 0.19
003	0.07	0.09	0.10	0.13	0.07	0.10	0.16	± 0.09
004	0.26	0.30	0.29	0.29	0.25	0.30	0.30	± 0.09
005	0.29	0.32	0.32	0.31	0.32	0.36	0.38	± 0.13
006	0.02	-0.01	0.00	0.04	0.01	0.05	0.07	± 0.08

续表 2

编号	25℃	35℃	45℃	55℃	65℃	75℃	85℃	频率温度稳定度/ $\times 10^{-6}$
007	0.20	0.21	0.24	0.29	0.19	0.23	0.30	± 0.17
008	0.13	0.11	0.13	0.14	0.09	0.10	0.13	± 0.05
009	0.43	0.42	0.43	0.43	0.41	0.46	0.48	± 0.12
010	0.13	0.14	0.16	0.21	0.19	0.18	0.22	± 0.16

2.2 相位噪声特性

为研究温补晶振的相位噪声性能,采用罗德与施瓦茨 FSWP8 相噪仪对所做产品的相位噪声进行测试。测试结果如图 10 所示。由图 10 可知,该产品静态相位噪声为 $-104 \text{ dBc/Hz}@10 \text{ Hz}$,

$-128 \text{ dBc/Hz}@100 \text{ Hz}$, $-150 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ kHz}$, $-156 \text{ dBc/Hz}@10 \text{ kHz}$, $-158 \text{ dBc/Hz}@100 \text{ kHz}$, $-159 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ MHz}$, 整体相位指标较好,可满足军用电子装备对晶振低噪声的指标要求。

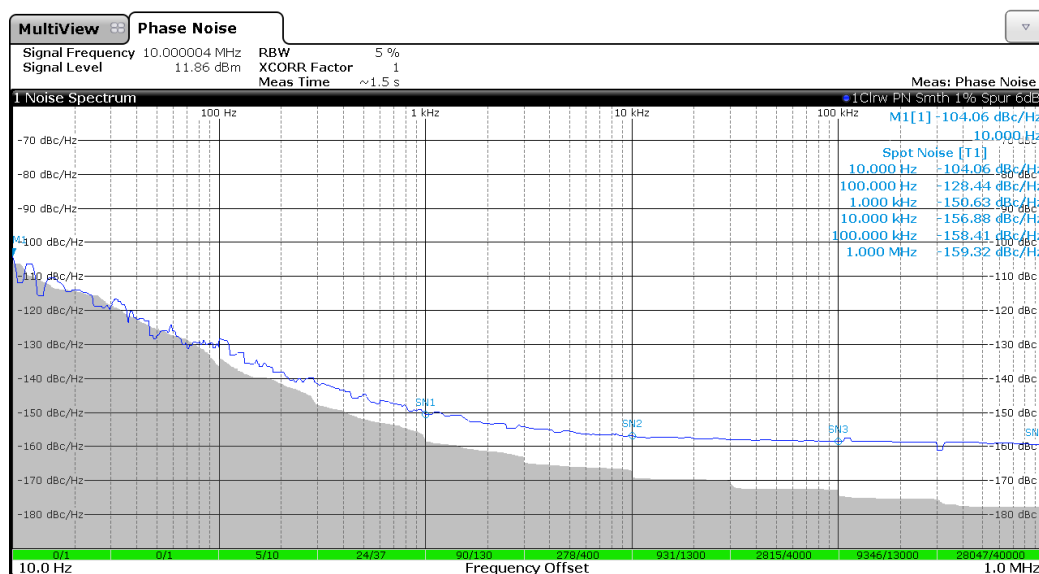


图10 相位噪声测试图

3 结论

本文介绍了温补晶振的工作原理,详细分析了温补晶振设计的有效方法。性能测试表明,通过这种方案设计的温补晶振,工作范围可加宽到 $-55 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim +85 \text{ }^{\circ}\text{C}$,频率温度稳定度优于 $\pm 0.28 \times 10^{-6}$,频率精度优于 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$,可满足军用电子器件的使用环境要求,该产品不仅技术指标优良而且产品功耗较低,可进行批量化生产。接下来我们还将进一步优化晶体谐振器的制作工艺,如采用抛光晶片,加入晶体预老化工艺,同时采用二次补

偿的方式对其性能进行改善。预计在 $-55 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim +85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,频率温度稳定度指标可实现优于 $\pm 0.1 \times 10^{-6}$,产品的老化特性也可进一步提高。该小型化宽温高精度温补晶振未来可替代一些低指标的恒温晶振,市场潜力巨大。

参考文献:

- [1] 赵声衡, 赵英. 晶体振荡器[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] JENNEWEIN B. The age of the precision oscillator: the role of the TCXO and DCXO[J]. Microwave Journal,

- 1998(41): 2.
- [3] 李辉, 吴华兵, 赵当丽. 晶振对飞行器时频同步系统的影响[J]. 时间频率学报, 2021, 44(3): 163-171.
- [4] 曹东, 徐向民. 基于GPIB总线结构的航空电子设备自动测试系统[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(32): 7951-7955.
- [5] 吴培才, 刘进忙, 胡国平. 温度补偿晶体振荡器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
- [6] 汪靖涛. 具有高精度的微机补偿表贴温补晶振: 中国, 102082548A[P]. 2011-06-01.
- [7] BECHMANN R. Frequency-temperature-angle characteristics of AT-type resonators made of natural and synthetic quartz[J]. Proceedings of the IRE, 1956, 44(11):1600-1607.
- [8] KAWASAKI T, NEMOTO K. Approximate N-th order function generating device and temperature compensation crystal oscillation circuit: US, 7154351 B2[P]. 2006-12-26.
- [9] VIG J. Quartz crystal resonators and oscillators for frequency control and timing applications-a tutorial[R]. USA: Development & Engineering Center Fort Monmouth, 2001.