

太空应用的微波谐振器和滤波器的温度补偿

Temperature Compensation of Microwave Resonators and Filters for Space Applications

作者 : Dr. ing. Marco Lisi 欧洲航天局欧洲空间研究与技术中心

微波谐振器和由数个级联谐振器组成的滤波器的温度表现是一个值得重视的设计目标。对于卫星上的应用尤其如此，因为太空中温度偏移更大而温度控制技术难以实现。其他温度补偿必不可少的场合包括高功率容量和窄滤波器带宽。

从概念上讲，有三种不同的方法可以处理温度稳定性。

1. 设计微波谐振器或滤波器时，使用在物理尺寸和电特性（如介电常数）两方面都具有高温度稳定性的材料。
2. 通过某种方法实现对该部件所处环境的温度的控制，从而移除温度漂移。
3. 根据所使用的物理上不同的和 / 或温度表现特性上不同的材料，将其设计为具有内置补偿技术的部件。

第一种方法通过使用高温度稳定性的材料让电特性对温度的灵敏度降低（见表 1）¹。铝是一种非常适合太空应用场合的谐振腔和滤波器的材料，因为它密度相对较低，热导率良好，机械加工性良好以及成本较低。不幸的是，铝的热膨胀系数（CTE）相当高，达到 23ppm/°C。相反，从机械稳定性角度来看，不变钢（invar）是一种近乎理想的材料，其 CTE 仅为 1.6ppm/°C（或更小，取决于合金成分）。但是作为一种铁镍合金（某种不锈钢），不变钢也有一些缺点：如密度过高（8050kg/m³，而铝密度仅为 2700kg/m³），机械加工性差，导热性差（与铝相差一个数量

级以上）和导电性差（为了达到高 Q 值，不变钢腔体必须镀银）。

用不变钢代替铝导致的重量增加不应被忽视，尤其是在卫星应用中。考虑到两种材料的密度比值（约为 3），一个 30 千克的不锈钢多工器如果用铝制成则仅为 10 千克重。假设同步卫星轨道发射费用为 15000 欧元 / 千克（亚利安 V 号运载火箭），采用铝制多工器将节省大约 300000 欧元。尽管有缺点，不变钢仍然是实现温度性能稳定的星载滤波器的常用解决方案。

表1
常用金属典型温度膨胀系数 (CTE)

材料	CTE (ppm/°C)
不变钢	<1.3
钛	8.5
不锈钢410	10.2
不锈钢316	16.0
铜	16.8
铍铜	16.7
黄铜	18.4
铝7075-T6	23.4
铝6061	23.6

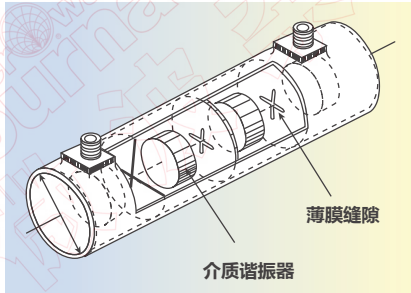


图 1. 介质加载双模滤波器。

用于缩小微波器件所处环境的温度变化范围的有源和无源温度控制技术能很好的适用于地面应用，但却不太适合星载应用。基于导热管 2 甚至高温超导体材料的花哨技术也被提出了，但在实践中很少实现。

几个有希望的不锈钢替代品尽管采用不同的技术，但都是以获得部件级高温稳定性为目标，同时采用低温稳定性但适合太空应用的材料。最广泛采纳的方法是基于使用两金属和三金属的温敏材料或形状记忆合金 (shape memory alloys, SMA)。总的来说，微波谐振器和滤波器的温度补偿技术通常结合了某种程度的新颖设计以及对谐振器电磁建模和材料物理特性的熟悉。

微波介质谐振器和印制电路滤波器

介质谐振器

基于微波陶瓷材料的介质谐振器常用于频率稳定振荡器 (DRO) 或者作为微波滤波器和天线的谐振器。它们的采用是在具有高介电常数、高品质因数、低温度系数和低加工成本的新型介质化合物的成熟之后迅速流行起来的。介质谐振器也用于加载双模滤波器的腔体，从而减小尺寸 (见图 1)^{3,4}。

一个介质谐振器的谐振频率的温度系数， τ_f ，由下式给出：

$$\tau_f = \frac{1}{f_0} \frac{\Delta f}{\Delta T} [\text{ppm}/^\circ\text{C}] \quad (1)$$

其中 f_0 是谐振频率， Δf 是和温度漂移 ΔT 相关的总的频率变化。温度系数 τ_f 是其他三个温度系数的函数：介电常数的温度系数 τ_ϵ ，包围介质谐振器的腔体的温度系数 τ_c 和介质材料的热膨胀系数的温度系数 α_L 。通过适当设计，可以实现非常低的 τ_f 。

微波印制电路滤波器

用于微波介质谐振器的材料也经常用于实现微波印制电路板薄膜滤波器。高介电常数陶瓷基片可以带来实质性的尺寸缩减 (对于低微波频段尤其有用，例如 L 和 S 波段)，同时也在很宽的温度范围 (典型值 -55°C 到 $+125^\circ\text{C}$) 获得优秀的温度稳定性 (仅数 ppm/ $^\circ\text{C}$)。

根据微波应用基片材料的不同，其大体可分为诸如石英、氧化铝、钛酸钡的非有机 (硬) 材料和诸

如 FR-4、石英聚酰亚胺和所有基于 PTFE 的材料 (例如 Duroid) 的有机 (软) 材料⁵。表 2 总结了一些常用材料的特性。

介电常数 ϵ_r 范围在 2 到 10 的软基片根据其化合物成分而表现出不同的温度性能。传统编织的和非编织的“玻纤强化 PTFE”材料 ($\epsilon_r=2-2.5$) 的 ϵ_r 具有的典型温度系数约为 $-150\text{ppm}/^\circ\text{C}$ (但在某些情况下会达到 $-350\text{ppm}/^\circ\text{C}$)。更近期出现的微波基片如玻璃、PTFE 和微粒分散陶瓷，能够获得更好的性能，其 ϵ_r 的温度系数可低至 $-10\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 。

微波腔体谐振器和滤波器

腔体谐振器的谐振频率基本上都会随着温度漂移而变化，其原因是腔体尺寸发生了变化。已经有多种用于补偿这种偏移的方法被提出了。最直接的方法是使用具有低温膨胀系数的不锈钢或类似材料制造谐振器，然而不锈钢价格不菲、密度大、难以

表 2
非有机和有机基片的电特性

材料	成分	ϵ_r	$T_g \delta (10^{-4})$	$TC (\epsilon_r)$ (ppm/ $^\circ\text{C}$)
非有机介质基片				
石英	SiO_2	3.75	1.5	+0.5
氧化铝(96%)	Al_2O_3	10.2	2	+7.5
钛酸钡	BaTiO_3	85	3	+8
有机介质基片				
Standard FR-4	玻纤	4.5	260	+200
Rogers Duroid 5870	PTFE任意玻纤	2.33	12	-115
Rogers 4003	编织玻璃强化碳化水化合物/陶瓷	3.38	27	+40
Rogers Duroid 6002	陶瓷填充PTFE	2.94	12	+12
Arlon CLTE-Xt	微粒陶瓷填充编织玻纤强化PTFE	2.94	12	-9

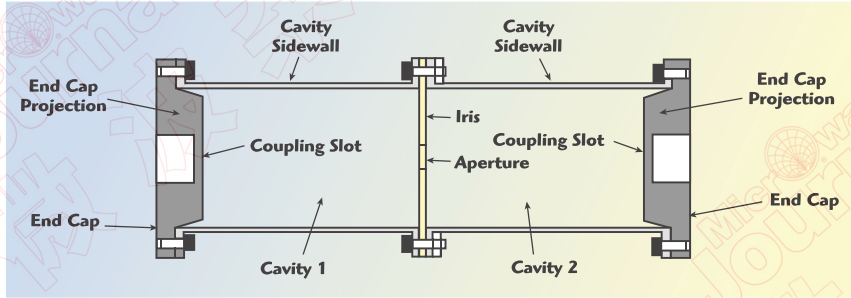


图2. 温度补偿腔体滤波器。

加工而且很容易产生无源交调分量 (PIM)。

一种替代方法是用介电常数的温度系数能够补偿谐振频率变化的介质材料来填充一部分腔体。另一种方法是使用具有不同温度膨胀系数的材料构造腔体。这种方法已经用于同轴凹腔式腔体谐振器，但它们在频率高于10GHz时表现出相对较差的品质因数。使用具有与腔体金属的温度膨胀系数不同的调谐螺钉的方法也被提出了^{6,7}。一种“蛮力”方法也许能将谐振器的腔体设计成温度变化引起的几何形变可被强制限制住或者可被“事实地”抑制住这种形式。这类谐振器又被叫做“强制腔体”谐振器。

一些温度补偿腔体滤波器在末端具有由更容易膨胀的比腔体侧壁CTE更高的材料做成的盖子。这使得末端盖子能在温度上升时向滤波器内弯曲。这样，腔体体积的净变化被降低了，或者经过适当设计后被实际地补偿掉了。图2是这种方法的一个例子⁸。

许多方法将腔体因热膨胀产生的形变想象成在腔体中加入了一个（或多个）调谐螺钉或活塞。调谐元件经

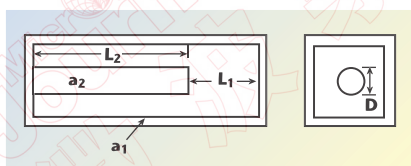


图3. 同轴腔体谐振器的几何结构。

常牢固地与温度敏感的驱动器（通常是双金属）连在一起。某些温度补偿腔体滤波器具有的双金属或三金属末端盖子能够在温度上升时向内弯曲。

双金属是一种平面部件具有两层（或更多）CTE 差别很大的金属材料。温度变化时，在平面尺寸上的差别形变会导致大的超出平面的弯曲。双金属在商业上用于廉价的恒温控制器和温度感应器（例如用于电热炉中）。

作为双金属补偿技术的一种替代，弹簧支撑 SMA 驱动器被提出了。SMA 是当加热到超过阈值时能够恢复记忆形状的一种材料。两种主要类型的形状记忆合金是铜铝镍和镍钛合金 (NiTi)。这些材料的一个潜在缺点是滞后效应，在更高温度时它将导致更多形变而不是缓解形变⁹。

同轴腔体谐振器的温度补偿

同轴腔体谐振器是梳状滤波器的主要单元（见图3）。通过合适地选择腔室和内导体的材料，能够达到完美的对谐振频率的温度补偿。同轴腔体谐振器的谐振频率为：

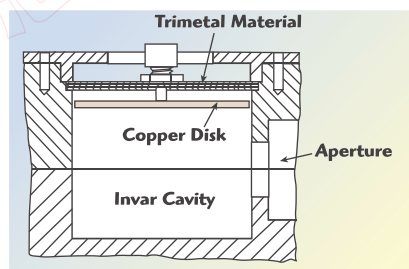


图4. 工作于TE011模式的温度补偿腔体谐振器。

$$\omega_0 C = \frac{1}{Z_0 \text{tg} \nu} \quad (2)$$

其中 ω_0 = 温度为 T_0 时的谐振频率

C = 缝隙 L_1 的电容

Z_0 = 同轴线的特性阻抗

ν = 内导体的电长度

如果 L_1 很小，那么：

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\pi D^2}{4L_1} = \frac{k}{L_1} \quad (3)$$

当温度为 T 时，缝隙电容变为：

$$(L_1 + L_2)(1 + \alpha_1 T) - L_2(1 + \alpha_2 T) \quad (4)$$

其中 α_1 和 α_2 分别是外壁和内导体温度膨胀系数。可以看出：

$$\frac{\omega_{0T}}{\omega_0} \cong \frac{(1 + \alpha^*) \text{tg} \nu}{\text{tg} [\nu(1 + \alpha_2 T)]} \quad (5)$$

其中：

$$\alpha^* = \alpha_1 + \frac{L_2}{L_1}(\alpha_1 - \alpha_2)$$

为了实现对谐振频率关于温度的良好补偿，如下条件必须被确认：

$$(1 + \alpha^*) \text{tg} \nu = \text{tg} [\nu(1 + \alpha_2 T)] \quad (6)$$

Yao 和 Atia 报道了这种补偿技术的一个例子¹⁰，他们设计和测试了一个温度补偿 8 极点梳状线椭圆函数滤波器，达到了 -2.8 ppm/°C 的等效

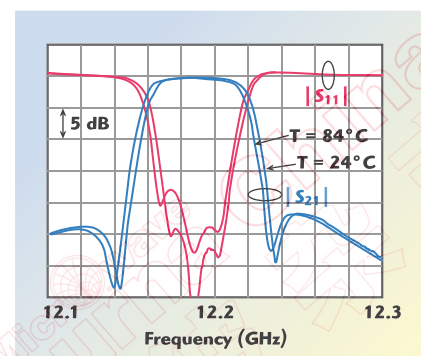


图5. 温度补偿滤波器在+24°C和+84°C的表现。

温度系数。

一个 Ku 频输出滤波器的内建温度补偿

图 4 展示了一个温度补偿技术的例子，它使用了一个活塞片调节一个工作于 TE₀₁₁ 模式的腔体谐振器。活塞本身严格固定在一个用温度可膨胀材料做成的圆盘上，使得温度变化可以引起腔体壁的轴向移动并调谐谐振频率。这个温度补偿腔体是一个完整的准椭圆四极点滤波器的一部分，若采用提取极点结构，则可以用作一个 12GHz 电视广播卫星有效载荷的输出多工器 (OMUX) 的一部分¹¹。

在这个应用中采用不变钢特别的不利。由于高功率容量要求 (450W 连续波) 和不变钢的低导热率，滤波器在某个局部 (热点) 能产生能高于环境的几十倍的温度。该设计利用了

TE₀₁₁ 模谐振腔的特性优点，即没有电流流经腔体上下壁和侧壁，从而允许使用一个非接触的活塞来形成一个端墙而不会恶化腔体性能。

已知谐振频率 F₀ 和腔体长度 L 的关系：

$$F_0 = c \sqrt{\left(\frac{1}{2L}\right)^2 + \left(\frac{R_m}{\pi D}\right)^2} \quad (7)$$

其中：L= 腔体长度；

D= 腔体直径；

R_m=TE₀₁₁ 模的贝塞尔根；

就可以计算出用于补偿由温度变化引起的任何频率偏移所需的活塞位移量。

温度敏感驱动器是一个能进行温度调节的三金属材料构成的圆盘，固定在腔体结构中并连接至作为腔体上

壁的铜质圆盘上。这个温度调节三金属由三层金属叠在一起构成并占据了整个界面，每一层具有不同的 CTE。当加热时，这个复合金属圆盘改变它的曲率，其改变规律是在很宽的温度范围随着温度线性变化。由此导致的在 Z 方向的位移量能够被计算出用以补偿腔体因温度变化产生的频偏。

图 5 展示了该补偿滤波器在普通环境温度和较高温度下的测试性能。测试结果显示 60℃ 的温漂 ΔT 的频偏为 2MHz，对应等效 CTE 仅 2.3ppm/℃。这个值已经非常接近不变钢的温度膨胀系数 (1.3ppm/℃)，比铝的温度膨胀系数 (23ppm/℃) 低了一个数量级。

结论

本文综合性地讨论了用于卫星

自主 研发&生产
DC to 67 GHz



微波 毫米波 精密测试

电缆组件 校准件 适配器



- 小驻波
- 低损耗
- 长寿命
- 高稳定性



南京安崇电子有限公司
www.arance-rf.com



sales@arance-rf.com tech@arance-rf.com
Tel: 86-25-58817997 Fax: 86-25-58072397

应用的微波结构（主要是谐振器和滤波器）的温度稳定性。温度补偿技术往往是精巧和创造性的设计结合对电磁结构和材料的物理特性的充分了解。■

参考文献

1. C. Wang, "Temperature Compensations for Microwave Resonators and Filters," IEEE International Microwave Symposium, June 2005.
2. B.F. Keats, "Bimetal Temperature

Compensation for Waveguide Microwave Filters," Ph.D. Thesis at University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2007.

3. C. Kudsia, R. Cameron and W.C. Tang, "Innovations in Microwave Filters and Multiplexing Networks for Communications Satellite Systems," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 40, No. 6, June 1992, pp. 113321149.
4. S.J. Fiedziuszko, "Miniature Dual-Mode, Dielectric-Loaded Cavity Filter," US Patent 4489293 A, 1984.
5. Alcatel Alenia Space, "Microwave Organic PCBs for Space Applications," 3rd CTB WG Hybrids Technical Presentation Day, ESTEC, May 2006.
6. R.V. Basil, L. Ondrups and J. K. Shimizu, "Thermally Compensated Microwave Resonators," US Patent 4,057,772, November 1977.
7. R. E. Jachowski and L. E. Brown, "Compensating Device for Tuned Cavities," US Patent 4,423,398, December 1983.
8. S.B. Lundquist, "Temperature Compensated Filter," US Patent 5,867,077, 1999.
9. B.F. Keats, R.B. Gorbet and R.R. Mansour, "Design and Testing of SMA Temperature-Compensated Cavity Resonators," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 51, No. 12, December 2003, pp. 228422289.
10. H.W. Yao and A.E. Atia, "Temperature Characteristics of Compline Resonators and Filters," IEEE International Microwave Symposium Digest, Vol. 3, May 2001, pp. 147521478.
11. R. Cameron, M. Lisi and S. Strijk, "Resonateur à Cavités avec Dispositif de Compensation Thermique," Brevet d'invention n. 8607497, 16 May 1986, ESA Patent.

射频解决方案

来自 **JFW Industries**

测试系统 固定衰减器 功分器
 程控衰减器 负载/终端器
 手动可变衰减器 射频开关
 测试附件



JFW Industries

Call 317-887-1340
 Toll Free 877-887-4JFW (4539)
 E-mail sales@jfwindustries.com
 Visit www.jfwindustries.com