

# 高温度稳定性腔体滤波器研究

李 军 贾宝富 张国柱 郑成迎

(电子科技大学应用物理研究所, 成都 610054)

**摘要:** 本文从腔体尺寸角度出发, 认为某一方向的尺寸随温度是线形变化的。推导出了腔体各个部件的温漂影响因子, 该因子反映了腔体的某个部件对整个腔体的温漂影响的大小。用三维仿真软件 HFSS 和 CST 去计算部件温漂影响因子, 所得结果基本一致。建立了抵消温漂的模型, 由该模型出发合理设计腔体各部分材料, 得出无温漂的腔体。用经过温补的腔体设计出了高温度稳定性的滤波器。

**关键词:** 材料温度系数, 温度补偿, 滤波器

## Study on High-Temperature Stability of the Cavity Filters

LI Jun, JIA Bao-fu, ZHANG Guo-zhu, ZHENG Cheng-ying

(Inst. of Appl. Phys., UEST of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** This paper at the point of cavity size, view that the changes of the size at some direction is linear with temperature varies. Deduced the temperature drift factor of cavity's components, the factor reflects the size of each component impact on the whole cavity's temperature drift. By 3D simulation software HFSS and CST, we can calculate the temperature drift impact factor of each component. The results agree with each other. Offset temperature drift model is established. The material of the cavity is rationally designed by the model, so we draw the cavity that have no temperature drift. Use the cavities that after temperature compensated to design a high-temperature stability filter.

**Key words:** Temperature coefficient of materials, Temperature compensation, Filters

## 引 言

随着通信事业的发展, 需要大量的接收和传输信道, 而这些信道只占据着有限的频带, 再加上用相邻的频带进行通信越来越普遍, 怎样使空间靠得很近的频带的使用不相互影响并且能有效利用, 这就要求滤波器具有高的选择性和温度稳定性来满足通信系统的需要。腔体滤波器, 由于带宽比较窄(1%~5%)、Q值高(大约为几千)、带内损耗小、阻带抑制性高、调谐方便、承受功率大等优点, 因而被广泛应用于通信系统中。影响腔体滤波器频率稳定性的一个重要因素就是温漂。

由于受材料热膨胀特性的影响, 滤波器的滤波特性也随温度变化而改变。特别对窄带腔体滤波器这种变化尤为明显。在国内外有给腔体滤波器加一些温度补偿装置, 使温漂得到补偿<sup>[1-2]</sup>。但研究较

多且最有效的温度补偿方法是根据合适的尺寸灵活使用材料的温度系数<sup>[3-5]</sup>, 使材料温度变化对腔体谐振频率的影响相互抵消。但这种方法带有很大的不确定因素, 并没有在尺寸和温度系数之间建立确切的关系。本文仍从尺寸和材料温度系数角度出发, 通过引入部件温漂影响因子 $\beta_i$ , 在材料温度系数和部件之间建立了确切的关系, 并根据该关系使腔体温漂得到补偿。利用温补后的腔体设计出了高温度稳定性的腔体滤波器。

## 1 温补模型的建立

设计中所用的材料, 在温度变化的时候会热胀冷缩, 其膨胀可分为线膨胀、面膨胀和体膨胀。所谓线膨胀, 是指固体在某一方向上的伸长量随温度的增加而增加的现象, 遵循膨胀公式:

$$l' = l(1 + \alpha t) \quad (1)$$

• 收稿日期: 2008-04-17

其中  $l$  为常温的尺寸,  $\alpha$  为材料的温度系数,  $t$  为实验温度与常温的差值。做低温实验时, “+”变成“-”号。常见材料的温度系数见表 1, 其中 ppm 为  $10^{-6}$ 。

表 1 一些常用材料的温度系数

材料名	CTE (ppm/°C)	备注
殷钢	<1.3	典型值为 0.9ppm/°C
钛	8.5	
不锈钢 410	10.2	
不锈钢 316	16	
铜	16.8	
铍铜	16.7	
黄铜	18.4	
铝 7075-T6	23.4	为安全起见, 所有铝
铝 6061	23.6	都取 24ppm/°C

建立如图 1 所示的腔体模型, 外腔体的底边是长为  $a$  的正方形, 高为  $h3$ 。腔体内有柱 1, 柱 2 两个柱体, 其高度分别为  $h1, h2$ , 半径分别为  $r1, r2$ 。其中  $h1=13\text{mm}$ ,  $r1=6\text{mm}$ ,  $h2=8.272\text{mm}$ ,  $r2=8\text{mm}$ ,  $h3=35\text{mm}$ ,  $a=31.25\text{mm}$ 。

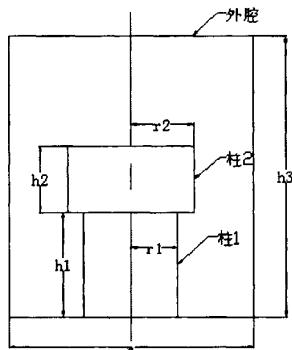


图 1 单个腔体模型

由于各个尺寸随温度变化, 对本征频率的影响各不相同, 且引起频率的改变量也不相等, 为此可建立如下等式<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\Delta f_i}{f_0} = \frac{\Delta x_i}{x_i} C_{xi} \quad (2)$$

其中  $f_0$  为没有尺寸变化时的腔体本征频率,  $\Delta x_i$  为温度变化而引起的尺寸  $x_i$  的改变量,  $\Delta f_i$  为  $\Delta x_i$  引起的本征频率的变化量,  $C_{xi}$  为  $x_i$  尺寸的长度频率灵敏度系数。整个腔体频率随温度变化可表示为:

$$\sum_i \frac{\Delta f_i}{f_0} = \sum_i \frac{\Delta x_i}{x_i} C_{xi} \quad (3)$$

只要:

$$\sum_i \frac{\Delta x_i}{x_i} C_{xi} = 0 \quad (4)$$

则腔体的温漂就为零。

当腔体模型已经建立后,  $x_i$  即被确定, 而  $C_{xi}$  是与  $x_i$  相关联的量, 也即被确定。此时可以改变的只有  $\Delta x_i$ ,  $\Delta x_i$  是与材料的温度系数和  $t$  相关联的量, 在模型中可以被改变。根据 (1) 式有:

$$\Delta x_i = x_i' - x_i = x_i \alpha_{xi} \Delta t \quad (5)$$

其中  $x_i'$  是  $x_i$  随温度变化后的尺寸。则:

$$\frac{\Delta x_i}{x_i} = \alpha_{xi} \Delta t \quad (6)$$

根据 (4) 式, 要使本文建立的模型温漂得到补偿, 则有如下关系:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta x_{h1}}{h1} C_{h1} + \frac{\Delta x_{r1}}{r1} C_{r1} + \frac{\Delta x_{h2}}{h2} C_{h2} + \frac{\Delta x_{r2}}{r2} C_{r2} + \\ \frac{\Delta x_{h3}}{h3} C_{h3} + \frac{\Delta x_a}{a} C_a = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

因为  $h1$  和  $r1$ ,  $h2$  和  $r2$ ,  $h3$  和  $a$  分别为同种材料同一部件的两个尺寸, 且根据 (6) 式有:

$$\begin{cases} \frac{\Delta x_{h1}}{h1} = \frac{\Delta x_{r1}}{r1} = \alpha_{柱1} t \\ \frac{\Delta x_{h1}}{h1} = \frac{\Delta x_{h1}}{h1} = \alpha_{柱2} t \\ \frac{\Delta x_{h1}}{h1} = \frac{\Delta x_{h1}}{h1} = \alpha_{外腔} t \end{cases} \quad (8)$$

其中  $\alpha_{柱1}, \alpha_{柱2}, \alpha_{外腔}$  分别为柱 1, 柱 2 和外腔体的材料温度系数, 则 (7) 式可化为:

$$\begin{aligned} \alpha_{柱1} (C_{h1} + C_{r1}) t + \alpha_{柱2} (C_{h2} + C_{r2}) t + \\ \alpha_{外腔} (C_{h3} + C_a) t = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

消去  $t$  可得:

$$\begin{aligned} \alpha_{柱1} (C_{h1} + C_{r1}) + \alpha_{柱2} (C_{h2} + C_{r2}) + \\ \alpha_{外腔} (C_{h3} + C_a) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

这里我们引入部件温漂影响因子  $\mathfrak{I}_i$ , 它是一个

反映了腔体的各个部件对腔体总的温漂产生影响大小的量:

$$\mathfrak{J}_1 = C_{h1} + C_{r1}, \mathfrak{J}_2 = C_{h2} + C_{r2}, \mathfrak{J}_3 = C_{h3} + C_a \quad (11)$$

$\mathfrak{J}_1, \mathfrak{J}_2, \mathfrak{J}_3$  分别为柱 1, 柱 2 和外腔的部件温漂影响因子, 一旦模型被建立后  $\mathfrak{J}_i$  也即被确定。则 (10) 式可进一步化为

$$\alpha_{柱1}\mathfrak{J}_1 + \alpha_{柱2}\mathfrak{J}_2 + \alpha_{外腔}\mathfrak{J}_3 = 0 \quad (12)$$

根据式 (2), 用三维仿真软件 CST 或 HFSS 可

求得各尺寸的  $C_{x_i}$  值。代入 (11) 式即可求得  $\mathfrak{J}_i$ 。

## 2 用三维仿真软件求解 $\mathfrak{J}_i$ 值

在 (2) 式中, 可以假设  $\Delta x_i/x_i = 0.01$  即  $h1, r1, h2, r2, h3, a$  这些尺寸变化量分别为 1%, 用 CST 或 HFSS 可求得相应的  $\Delta f$  值, 再由 (2) 式可求得相应的  $C_{x_i}$  值。表 2, 表 3 分别为在 CST 和 HFSS 中计算的结果。

表 2 在 CST 中计算的结果 ( $f_0 = 2418.457\text{MHz}$ )

尺寸	$h1$ (13mm)	$r1$ (6mm)	$h2$ (8.272mm)	$r2$ (8mm)	$h3$ (35mm)	$a$ (31.25mm)
$\Delta f$	-12.532MHz	8.995MHz	-7.759 MHz	-13.523MHz	1.874 MHz	-3.751MHz
$C_{x_i}$	-0.518	0.372	-0.321	-0.559	0.077	-0.155

表 3 在 HFSS 中计算的结果 ( $f_0 = 2426.17\text{MHz}$ )

尺寸	$h1$ (13mm)	$r1$ (6mm)	$h2$ (8.272mm)	$r2$ (8mm)	$h3$ (35mm)	$a$ (31.25mm)
$\Delta f$	-12.181MHz	9.170MHz	-6.823 MHz	-11.921MHz	1.482 MHz	-3.530 MHz
$C_{x_i}$	-0.502	0.378	-0.281	-0.491	0.061	-0.146

将 CST 中的计算结果代入 (11) 式可得:

$$\mathfrak{J}_1 = -0.146, \mathfrak{J}_2 = -0.88, \mathfrak{J}_3 = -0.078 \quad (13)$$

将 HFSS 中的计算结果代入 (7) 式可得:

$$\mathfrak{J}_1 = -0.124, \mathfrak{J}_2 = -0.772, \mathfrak{J}_3 = -0.085 \quad (14)$$

比较 (13)、(14) 两式, 可见用两个软件仿真所求得的结果基本一致。将 (13) 式代入 (12) 式可得:

$$-0.146\alpha_{柱1} - 0.88\alpha_{柱2} - 0.078\alpha_{外腔} = 0 \quad (15)$$

由上述可见, 在材料温度系数全为正的情况下, 柱 2 对谐振腔的温漂影响最大, 所以它应选用材料温度系数小的材料做成, 外腔对谐振腔的温漂影响最小, 在允许的条件下, 它可以用材料温度系数大的材料做成。理论上, 只要找到三种材料或者两种材料使 (15) 式成立, 则腔体就可以达到温度补偿, 此时需要引入负温度系数的材料。对于负材料温度系数的材料, 日本研究人员已开发出成品。

上述对温漂的研究方法也适用于其它只从尺寸角度研究温漂的腔体。

## 3 高温度稳定性滤波器仿真

在引入负材料温度系数的条件下, 根据表 1 中

一些材料的温度系数, 在式 (15) 中取  $\alpha_{柱1} = \alpha_{外腔} = 0.9\text{ppm}/\text{C}$ , 即柱 1 和外腔都为殷钢材料, 可求得  $\alpha_{柱2} = -0.23\text{ppm}/\text{C}$ , 即只要柱 2 用温度系数为  $-0.23\text{ppm}/\text{C}$  的材料做成即可使腔体的温漂为零。

为了突出温度补偿的效果, 我们对同样尺寸的腔体, 让其全部由铝材料做成, 与采取补偿过后的腔体进行了比较, 在 CST 中, 让温度差  $t$  在  $0^\circ\text{C}$ ~ $100^\circ\text{C}$  范围内变化, 观察它们的温漂特性。仿真结果如图 2。可见补偿效果非常显著。

分别用三个未经过补偿的腔体和三个经过温度补偿的腔体做成了两个同样指标要求的三阶带通滤波器, 如图 3。当  $t$  在  $0^\circ\text{C}$ ~ $100^\circ\text{C}$  范围变动的情况下, 研究了它们的温漂特性。未经温度补偿的滤波器的温漂特性如图 4, 经过温度补偿的滤波器的温漂特性如图 5。比较图 4、图 5 可见补偿效果比较明显。图 5 中, 随着温度变化, 滤波器中心频率和两边带的频率都没有发生变化, 滤波器没有发生频漂, 但回波损耗有所改变, 这是因为相邻腔体间的耦合窗, 随着温度的增加而变大, 使腔体间耦合

发生了轻微变化。

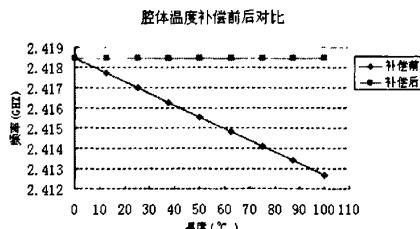


图2 单个腔体温补前后对比



图3 CST中的滤波器模型

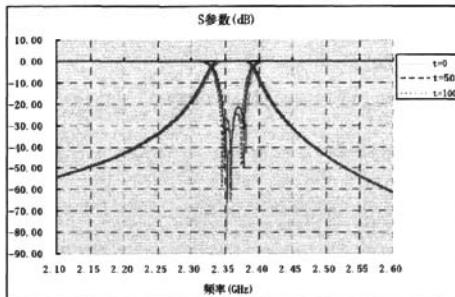


图4 未经补偿的滤波器温漂特性

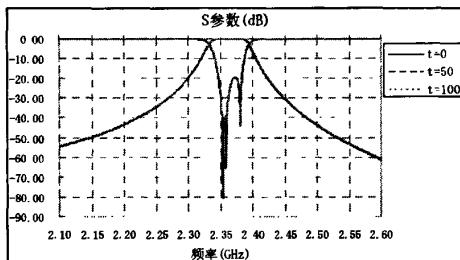


图5 补偿后的滤波器温漂特性

## 4 结论

通过推导引入了腔体的部件温漂因子 $\beta_i$ ，该因子反映了不同部件对腔体温漂的影响大小。将该因子和部件的材料温度系数用确切的式子联系起来。在所有材料温度系数都为正的条件下，通过求得各个部件的温漂因子，得出具体的某个部件对腔体温漂的影响量。根据各个部件的温漂影响因子，可对腔体各个部件选择合适的材料温度系数，使腔体的温漂尽量减小。这对腔体滤波器的设计具有很大的指

导意义。在引入负材料温度系数的情况下，得到无温漂的腔体，并利用无温漂的腔体设计出了温度稳定的腔体滤波器。这对高温度稳定性腔体滤波器的设计具有一定的参考价值。

仿真结果和理论推导具有很好的一致性。

## 参 考 文 献

- [1] Brian F.Keats, Raafat R, Mansour and Robert B.Gorbet. Design and testing of thermally stable filter using bimetal compensation[J]. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp 2007,3: 1293-1296
- [2] Jilong Ju. A novel configuration of temperature compensation in the resonant cavities. IEEE Tans Microwave Theory and Techniques. 2004, 52(1): 139-143
- [3] C.Wang, K. A. Zaki . Temperature compensation of combine resonators and filters . IEEE MTT-S Int.Microwave Symp[J]. 1999,3: 1041-1044
- [4] Hui-Wen Yao, Ali E.Ati. Temperature Characteristics Of Comline Resonators and filters . IEEE MTT-S Int. Microwave Symp[J]. 2001,3: 1475-1478
- [5] J. Muller, M.Hoft. Temperature compensation of resonators using different materials and suitable dimensions. Proc,35<sup>th</sup> European Microwave conf, 2005. 685-688
- [6] Darko Kajfez, Siva Chebolu,Ahmed A.Kishk, et al. Temperature dependence of composite microwave cavities. IEEE Tans Microwave Theory and Techniques.2001,49(1): 80-85

**李军** 男, 1983年生, 现为成都电子科技大学应用物理研究所无线电物理专业研究生, 研究方向毫米波电路与系统。

**贾宝富** 男, 工学博士。1998年至2002年接受汉城国立大学邀请任访问教授。从事微波电子学、微波电路与系统、毫米波功率合成、微波隐身技术和微波 CAD 技术等方面的研究。

**张国柱** 男, 1979年生, 现为成都电子科技大学应用物理研究所无线电物理专业研究生, 研究方向毫米波电路与系统。

**郑成迎** 男, 1975年生, 现为成都电子科技大学应用物理研究所无线电物理专业研究生, 研究方向毫米波电路与系统。

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



### 微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

### 更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

**易迪拓培训**

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>