

## 结构参数对微波介质滤波器电性能的影响

张 龙, 陈世叙, 刘光聪, 刘积学, 薛 伟, 蒋洪平, 侯京川

(中国电子科技集团公司第26研究所, 重庆 400060)

**摘要:** 利用 Ansoft-HFSS 仿真软件对微波介质滤波器进行建模及仿真, 总结了结构参数对其电性能影响的变化规律, 并提取了最优的器件结构参数。采用传统的电子陶瓷生产工艺制备样品, 利用此规律指导器件的后期调试工作。结果表明, 中心频率  $f_0 = 2493.0$  MHz, 插入损耗  $IL = 1.539$  dB, 3 dB 带宽  $BW_{3\text{dB}} = 30.2$  MHz, 带内波动小于 0.1 dB, 在  $f_0 - 125$  MHz 外带外抑制  $L_s > 45$  dB; 在  $f_0 + 125$  MHz 外  $L_s > 65$  dB, 电压驻波比  $VSWR < 1.2$ 。测试结果与仿真结果吻合, 验证了该规律的可行性和正确性。

**关键词:** 微波介质滤波器; 1/4 波长同轴谐振器; 仿真软件 Ansoft-HFSS; 结构参数

中图分类号: TN713 文献标识码: A

### Effect of Structure Parameters on Electric Properties of Microwave Dielectric Filter

ZHANG Long, CHEN Shichai, LIU Guangcong, LIU Jixue, XUE Wei,  
JIANG Hongping, HOU Jingchuan

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** The model and simulation of microwave dielectric filter has been carried out by using the Ansoft-HFSS software. The effect of the structure parameters on the electric properties of microwave dielectric filter has been summarized and the optimal structure parameters of the filter have been extracted. The filter sample was fabricated by conventional electronic ceramic process, and the later stage debugging of the filter has been carried out. The measured results showed that  $f_0$  was 2493.0 MHz, the insertion loss was 1.539 dB,  $BW_{3\text{dB}}$  was 30.2 MHz, the ripple in pass-band was less than 0.1 dB, the attenuation exceeded 45 dB at  $f_0$  of -125 MHz, exceeded 65 dB at  $f_0$  of +125 MHz respectively,  $VSWR$  was less than 1.2. The measured results confirmed the feasibility and validity of this design, which can meet the requirement of the filter.

**Key words:** microwave dielectric filter; 1/4 wavelength coaxial resonator; simulation software Ansoft-HFSS; structure parameter

### 0 引言

随着高频段无线电波资源的开发利用, 高频、微波移动通信事业的迅猛发展及微波介质陶瓷材料性能的不断提高, 由微波介质陶瓷材料制备成的滤波器因其具有微型化, 损耗低, 频率温度系数小及成本低等特点, 被广泛应用于电子对抗、导航通讯、警戒雷达、家用卫星直播电视接收机和移动电话等设备中。然而, 微波介质滤波器结构对其性能的影响需求解复杂的电磁场方程, 其结构计算费时费力, 限制其发展。故微波介质滤波器结构参数对其电性能的影响, 对其设计和调试具有指导意义。

本文利用高频结构仿真软件 Ansoft-HFSS 对微波介质滤波器进行模拟, 并以此为基础讨论滤波

器结构参数的变化(如滤波器长度  $L$ 、耦合孔半径  $r$  及谐振孔径  $R$  等)对其电性能参数(如中心频率  $f_0$ 、3 dB带宽  $BW_{3\text{dB}}$  及带内插损  $IL$  等)的影响规律。利用传统电子陶瓷生产工艺制备样品, 利用此规律指导器件的后期调试工作, 使样品满足设计技术指标要求。

### 1 LJ2492M型微波介质滤波器的设计与仿真

表1为微波介质滤波器的电性能技术指标。图1为 LJ2492M型微波介质滤波器结构图。根据文献[1]及微波介质滤波器的技术指标, 初步计算出器件的结构参数  $L = 27$  mm;  $W = 8$  mm; 介质谐振子高度  $H = 4.90$  mm, 谐振孔直径  $D = 2.6$  mm, 3个耦合孔直径  $d_1 = d_2 = d_3 = 2$  mm。

收稿日期: 2011-07-21

作者简介: 张龙(1968-), 男, 重庆人, 高级工程师, 主要从事声表面波技术的研究。通信作者: 陈世叙(1982-), 男, 广东汕尾人, 工程师, 硕士, 主要从事微波器件的研究。E-mail: collinscsc@yahoo.com.cn

表1 电性能技术指标

电性能参数	技术指标
$f_0/\text{MHz}$	$2492 \pm 2$
$BW_{3\text{ dB}}/\text{MHz}$	$30 \pm 3$
插入损耗 $IL/\text{dB}$	$\leq 2$
带外抑制 $L_s/\text{dB}$	$\geq 40 (f_0 - 100 \text{ MHz} \text{ 外})$ $\geq 55 (f_0 + 100 \text{ MHz} \text{ 外})$
带内波动/dB	$\leq 0.5$
电压驻波比 VSWR	$\leq 1.5$
测试系统阻抗/ $\Omega$	50

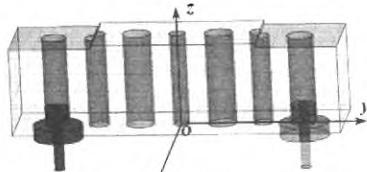


图1 LJ2492M型微波介质滤波器结构图

根据上述滤波器结构参数,通过高频结构仿真软件 Ansoft-HFSS 对器件进行模拟仿真,调整耦合孔径,即改变耦合电感的强弱;通过调节  $H$ ,可改变滤波器的  $f_0$ ;通过不断修正初步计算的结构参数,得到最优的器件结构参数,即当  $D=2.4 \text{ mm}$ 、 $d_1=d_2=d_3=1.55 \text{ mm}$ 、 $H=4.78 \text{ mm}$  时,微波介质滤波器的  $f_0=2492 \text{ MHz}$ ,  $IL=1.58 \text{ dB}$ ,  $BW_{3\text{ dB}} \approx 30 \text{ MHz}$ , 带内波动小于  $0.1 \text{ dB}$ ,  $L_s \geq 40 \text{ dB}$ ( $f_0 \pm 50 \text{ MHz}$ ),  $VSWR=1.12$ 。S 参数仿真曲线如图2、3 所示。

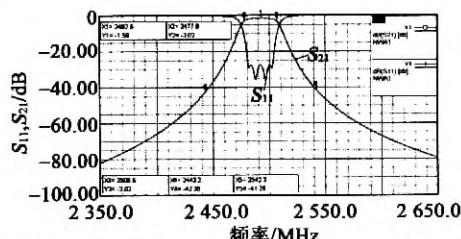


图2 HFSS软件三维全波仿真介质滤波器S参数曲线

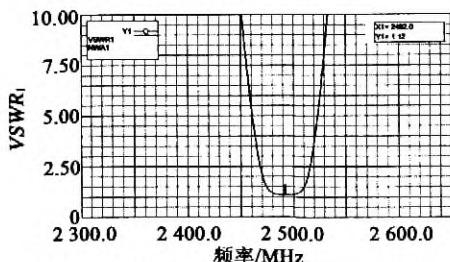


图3 介质滤波器的VSWR仿真曲线

计算获取的结构参数与高频结构仿真软件 Ansoft-HFSS 提取的结构参数差别较大,主要是由于电容耦合带通滤波器进行微波介质滤波器的微波实现转换时,出现了计算误差。该型号介质滤波器结

构是4阶连体式独石型结构,而电容耦合滤波器的微波实现是采用单一谐振孔介质同轴谐振子的经验公式分别计算4阶同轴谐振子的参数,然后将4个介质同轴谐振子组合成4阶介质滤波器,同时谐振孔和耦合孔的计算也没考虑其他谐振孔及相邻耦合孔对其寄生参数的影响,因此计算获取的结构参数与软件提取的差别较大。

## 2 结构参数变化对其电性能影响

### 2.1 H与其电性能关系

图4为  $H$  与  $f_0$  的关系。由图可知,随着滤波器高度  $H$  的增加,介质滤波器的  $f_0$  呈下降趋势,这与  $f=c/4L\sqrt{\epsilon_r^{1/2}}$  (其中,  $c$  为光速,  $\epsilon_r$  为相对介电常数,  $L$  为谐振腔沿电磁波传播方向的长度,在连体式滤波器中,相当于高度  $H$ )一致。同时发现,  $H$  增加 0.05 mm,  $f_0$  将下降约 5~10 MHz,因此,一般通过调整  $H$  来改变其  $f_0$ 。虽然通过调整其他参数(如输入、输出的耦合电容)也可改变  $f_0$ ,但效果较差,一般只作为微调的手段。

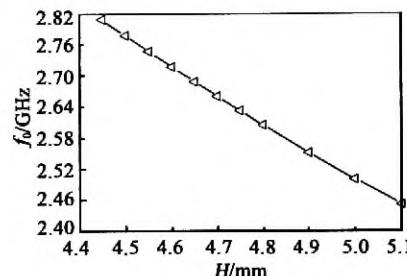


图4 H与f0的关系

$H$  与  $L_s$  有关,具体表现在各谐振孔的高度大小。图5为  $H$  与  $L_s$  的关系。 $H_{R1}, H_{R4}$  分别为输入、输出谐振孔的高度; $H_{R2}, H_{R3}$  分别为中间2个谐振孔的高度。由图可知,随着  $H_{R1}, H_{R4}$  的增大, $L_s$  表现出先缓慢下降,后急剧下降趋势。而  $H_{R2}, H_{R3}$  增大,对  $L_s$  影响不大。

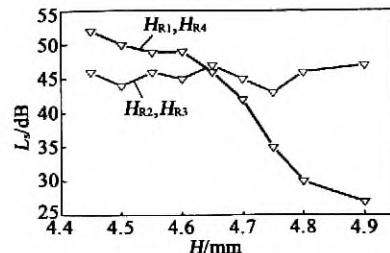


图5 H与Ls的关系

### 2.2 谐振孔直径 D与其电性能关系

图6为介质谐振器与外围电路间相互耦合的等

效电路图。其中,  $C_r$  和  $L_r$  组成的并联谐振回路代表空载的谐振器, 其谐振频率为  $f_0$ 。  $R_0$  和  $C_0$  分别为源电阻和杂散电容,  $C_{01}$  为介质谐振器与外围电路间的耦合电容。 $R_e$  和  $C_e$  分别为等效的源电阻和电容。频率漂移系数  $\tau_f$  为<sup>[3]</sup>

$$\tau_f = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + C_e/C_r}} \quad (1)$$

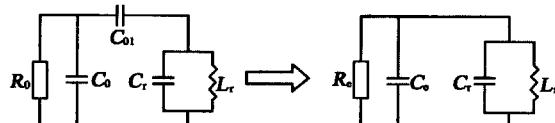


图 6 介质谐振子与外围电路的等效电路

当谐振孔直径  $D$  增大时, 根据平板电容大小与面积成正比可知, 输入、输出电容  $C_{01}$  增大, 由于  $C_{01}$  增大,  $C_e$  也相应增大, 故  $\tau_f$  也增大,  $f_0$  也随着  $D$  的增大而呈上升趋势, 如图 7 所示。

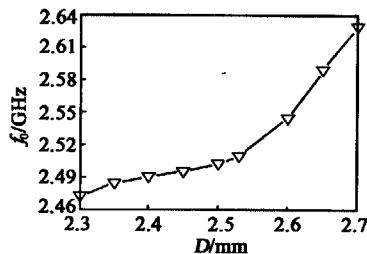


图 7  $D$  与  $f_0$  的关系

图 8 为微波介质滤波器的  $D$  与  $BW_{3 \text{ dB}}$  的关系。由图可知,  $BW_{3 \text{ dB}}$  随着  $D$  的增大而增大。根据图 6 的等效电路分析可知, 输入、输出耦合电容增大引起带宽相应增大。图 9 为  $D$  与  $IL$  的关系曲线。由图可知, 随着  $D$  的增大,  $IL$  表现出恶化的现象。

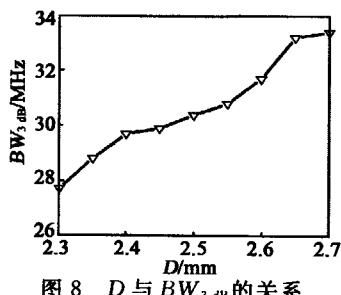


图 8  $D$  与  $BW_{3 \text{ dB}}$  的关系

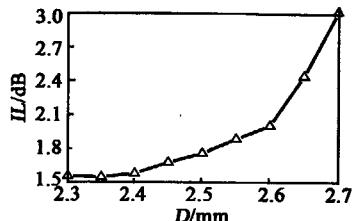


图 9  $D$  与  $IL$  的关系

### 2.3 耦合孔直径 $d$ 与其电性能关系

图 10 为 LJ2492M 型微波介质滤波器的  $d$  与  $f_0$  的关系曲线。由图可知, 随着  $d$  的增大,  $f_0$  逐渐向低频方向偏移, 且偏移速率有加大趋势。

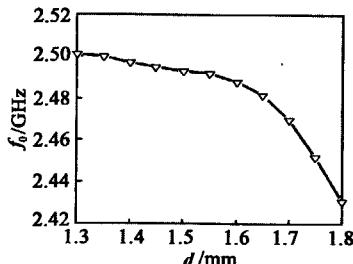


图 10  $d$  与  $f_0$  的关系

图 11 为  $d$  与  $BW_{3 \text{ dB}}$  的关系曲线图。由图可知, 随着  $d$  增大, 两种型号微波介质滤波器带宽  $BW_{3 \text{ dB}}$  均呈现出逐渐增大的规律, 但  $d$  增加到一定程度时,  $BW_{3 \text{ dB}}$  变化不明显。

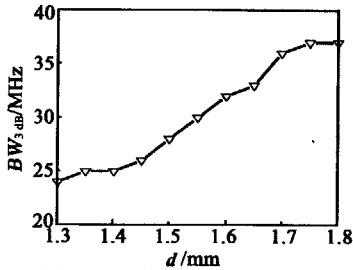


图 11  $d$  与  $BW_{3 \text{ dB}}$  的关系

图 12 为  $d$  与  $IL$  的关系, 由图可见, 随着  $d$  的增大, 两种型号微波介质滤波器的  $IL$  均呈快速下降现象, 但  $d$  增大到一定时, 对  $IL$  的影响不明显。

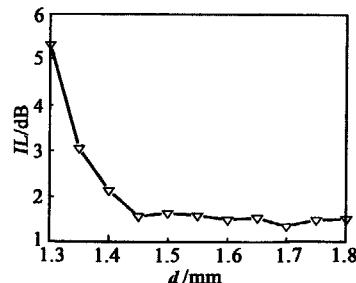


图 12  $d$  与  $IL$  的关系

图 11、12 出现的规律, 可由微波介质滤波器基本原理进行解释。耦合电容大小与介质滤波器带宽  $BW_{3 \text{ dB}}$  成正比。微波介质滤波器耦合电容由微波介质陶瓷块上的一个耦合通孔实现。由于  $d$  增大, 相当于平板电容两极板面积增大, 由平板电容设计公式可知, 其他条件不变情况下, 增加平板电容两极板面积, 电容容值将增大, 由此可推出耦合孔直径增大将等效于耦合电容增大, 从而引起介质滤波器  $BW_{3 \text{ dB}}$  增大。由

$$IL = \frac{4.343f_0}{BW_{3\text{ dB}}Q_u} \sum g_i \quad (2)$$

可知,  $IL$  与  $BW_{3\text{ dB}}$  成反比。其中  $Q_u$  为无载品质因数;  $g_i$  为滤波器的低通原型参数。与其他因素相比,  $BW_{3\text{ dB}}$  对滤波器  $IL$  的影响大, 因而  $IL$  减小。

$L_s$  是滤波器的一项重要性能指标, 它反映了滤波器对干扰信号的抑制能力。一般阻带距离中心频率越近越好,  $L_s$  越大, 滤波器选频特性越好。由于  $d$  增大将引起  $BW_{3\text{ dB}}$  增大, 在  $f_0$  和  $L_s$  与中心频率的距离保持不变时, 相对带宽增大,  $L_s$  必然减小, 如图 13 所示。由此可见,  $BW_{3\text{ dB}}$  和  $L_s$  两者不可兼顾, 在进行滤波器设计时, 必须依照实际需要进行考虑。

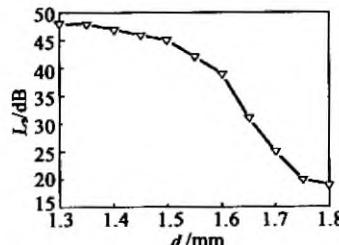


图 13  $d$  与  $L_s$  的关系

### 3 LJ2492M 型微波介质滤波器样品测试

介质谐振子采用上述的传统陶瓷制备工艺制备, 工艺成熟稳定, 重复性较好, 易于操作; 引脚采用自行设计的聚四氟乙烯加锌白铜材料制作, 需开专用的模具, 采用注塑工艺制作; 外壳采用锌白铜材料, 经过产品组装即可进行最后调试工作, 使器件满足技术指标要求。LJ2492M 型微波介质滤波器实物外形如图 14 所示。

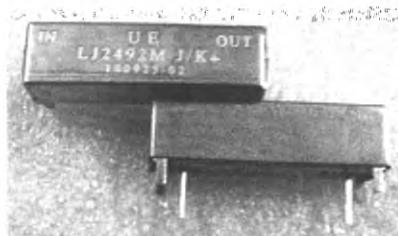


图 14 LJ2492M 型微波介质滤波器实物外形图

利用 AV3629A 矢量网络分析仪, 将专用设计的测试夹具夹持器件进行测试, 测试结果表明,  $f_0 = 2493.0 \text{ MHz}$ ,  $IL = 1.539 \text{ dB}$ ,  $BW_{3\text{ dB}} = 30.2 \text{ MHz}$ , 带内波动小于  $0.1 \text{ dB}$ , 在  $f_0 - 50 \text{ MHz}$  外  $L_s > 25 \text{ dB}$ ; 在  $f_0 + 50 \text{ MHz}$  外  $L_s > 30 \text{ dB}$ ; 在  $f_0 - 125 \text{ MHz}$  外  $L_s > 45 \text{ dB}$ ; 在  $f_0 + 125 \text{ MHz}$  外  $L_s > 65 \text{ dB}$ , 电压驻波比  $VSWR < 1.2$ 。图 15 为器件 S 参数测试曲线。测试 S 参数曲线与仿真结果比较吻合, 且测试结果的各项指标均优于设计技术指标。

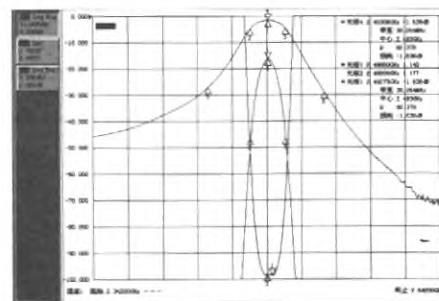


图 15 LJ2492M 型微波介质滤波器 S 参数实测图

由图 15 还可看出,  $S_{21}$  参数衰减特性曲线在高于中心频率一侧的倾斜度比较陡峭, 而在低于中心频率的一侧, 其衰减特性曲线的倾斜度则较平缓。这是由于该微波介质滤波器的谐振孔间引入了耦合孔, 而耦合孔在相邻的 2 个谐振孔间起着电感耦合作用, 因而滤波器在频率无穷大的地方增加了一个零点, 即信号不能通过的点。因此导致滤波器的  $S_{21}$  衰减特性曲线如图 15 所示的不对称性, 且低频段的衰减特性差于高频段。

### 4 结束语

提出了一种结构新颖可靠性高的微波介质滤波器, 并利用 Ansoft-HFSS 仿真软件对其进行建模及仿真, 研究了结构参数对其电性能影响的变化规律及其产生的因素。同时采用传统的电子陶瓷生产工艺制备样品, 利用此规律指导器件的后期调试工作。结果表明,  $f_0 = 2493.0 \text{ MHz}$ ,  $IL = 1.539 \text{ dB}$ ,  $BW_{3\text{ dB}} = 30.2 \text{ MHz}$ , 带内波动小于  $0.1 \text{ dB}$ , 在  $f_0 - 125 \text{ MHz}$  外  $L_s > 45 \text{ dB}$ ; 在  $f_0 + 125 \text{ MHz}$  外  $L_s > 65 \text{ dB}$ ,  $VSWR < 1.2$ 。测试结果与仿真结果吻合, 验证了该规律的可行性和正确性。

### 参考文献:

- [1] 张龙, 刘良芳, 陈世钗, 等. 1616 MHz 微波介质滤波器的设计及制作[J]. 压电与声光, 2011, 33(4): 509-512.  
ZHANG Long, LIU Liangfang, CHEN Shichai, et al. Design and fabrication of microwave dielectric filter application at 1616 MHz[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(4): 509-512.
- [2] 吴坚强. 高可靠性贴片式介质滤波器的设计与制作[J]. 压电与声光, 2009, 31(5): 664-666.  
WU Jianqiang. Design and manufacture of SMD dielectric filter with high reliability[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, 31(5): 664-666.
- [3] HANO K, KOHRIYAMA H, SAWAMOTO K. A direct-coupled lambda/4-coaxial resonator bandpass filter for land mobile communications[J]. Trans Microwave Theory and Techniques, 1986, MTT-34: 972-976.

## 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>