

# 1/4 波长同轴型微波介质滤波器的设计与仿真

梁 飞 吕文中 汪小红 周东祥

(华中科技大学 电子科学与技术系, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 采用 HFSS 软件对 1/4 波长同轴型微波介质滤波器进行模拟仿真, 在此基础上详细讨论谐振器间耦合系数  $K$ , 频率漂移系数  $\eta$  以及外界品质因数  $Q_e$  随端口电极宽度  $a$ , 耦合孔直径  $D$  的变换规律。

**关键词:** 微波介质滤波器; 品质因数; 耦合系数; 频率漂移系数

**中图分类号:** TN612 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4512(2004)04-0093-03

## The design of $1/4 \lambda$ coaxial microwave dielectric and its simulation filter

Liang Fei Lu Wenzhong Wang Xiaohong Zhou Dongxiang

**Abstract:** A bandpass filter was constructed by using  $\lambda/4$ -coaxial resonators. The resonators were made of metallized high- $\epsilon_r$  and microwave dielectric ceramics. They were directly coupled each other by coupling apertures between the resonators. In order to couple the input and output resonators to the external circuit, a rectangular metal film was formed near the resonators open-circuit end. The structure of filter was designed by HFSS software to discuss the relation among the factors such as end electrode width  $w$  and coupling apertures diameter  $D$  and properties such as the resonate frequency  $f_1$ , coupling coefficients  $K$  between resonators and external  $Q_e$  at both end electrodes. According to the discussion, the required dielectric filter can be designed and fabricated.

**Key words:** microwave dielectric filter; quality coefficient; coupling coefficient; frequency shift coefficient

**Liang Fei** Lect.; Dept. of Electronics Sci. & Tech., Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China.

## 1 滤波器设计原理

微波介质滤波器为采用介电常数 71 的陶瓷介质材料, 加上电子陶瓷工艺制作而成的一块长方体。沿长度方向有 3 个通孔, 中间孔为耦合孔, 其余两个孔为谐振孔。除三个通孔所在一面以及端口电极周围区域外, 介质块其余表面全部进行金属化, 其结构示意图如图 1 所示。

该介质滤波器由两个谐振器构成, 每个谐振器谐振孔的长度大约为谐振频率处的 1/4 波长, 即构成一个 1/4 波长谐振器。在介质滤波器中, 未

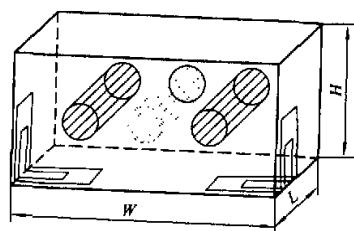


图 1 微波介质滤波器结构示意图

金属化的端面为开路面, 此处电场强度最大。与开路面相对的另一个端面为短路面, 此处磁场强度最大。两个 1/4 波长同轴谐振器间通过耦合孔相互耦合。当输入信号经金属电极由电容耦合到一

收稿日期: 2003-09-22.

作者简介: 梁 飞(1975-), 男, 讲师; 武汉, 华中科技大学电子科学与技术系(430074)。

E-mail: afei\_liang@tom.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60001002); 国家高技术研究发展计划资助项目; 湖北省科技攻关资助项目。

个近似于终端短路的同轴谐振器中时,在谐振频率点产生谐振,能量将由两谐振器间的耦合孔耦合到输出端的同轴谐振器,然后再经过输出端电极与陶瓷块周围电极的电容耦合输出<sup>[1]</sup>. 输入输出的耦合强弱可以通过调节输入输出电容的大小(即调节电极大小)来控制;而级间耦合强弱则可通过调整耦合孔的直径来确定.

## 2 滤波器结构参数设计

### 2.1 谐振频率

根据微波理论<sup>[2]</sup>,1/4 波长同轴谐振器的谐振频率  $f_0 = C/(4L\sqrt{\epsilon_r})$ ,式中, $C$  为光速; $L$  为谐振腔沿电磁波传播方向的长度.从上式可以看出,谐振器的谐振频率  $f_0$  主要依赖它沿波传播方向的长度  $L$ ,而与其宽度  $W$  和厚度  $H$  无关.

### 2.2 无载品质因数

介质谐振器要求小的插入损耗

$$B_0 = \frac{4.343f_0}{w_B Q_u} \sum g_i,$$

式中, $w_B$  为 3 dB 带宽(MHz); $g_i$  为滤波器的低通原型参数; $Q_u$  为单谐振器的品质因数, $1/Q_u = 1/Q_0 + 1/Q_c$ ,式中, $Q_0$  为陶瓷介质的品质因数; $Q_c$  为谐振器表面金属膜的  $Q$  值, $1/Q_c = [2/(\omega_0 \mu_0 \sigma_0)]^{1/2}[(1/r + \pi/(2W))/\ln(2W/(\pi r)) + 1/L]$ ,式中, $r$  为介质谐振器中谐振孔的半径; $\mu_0$  为介质谐振器表面金属膜的磁导率; $\sigma_0$  为介质谐振器表面金属膜的电导率; $\omega_0$  为角频率.

在  $L$  一定的条件下,同轴谐振器具有最小衰减条件为  $W/r = 3.592$ .此时,所构成的谐振器  $Q$  值最高,有利于制成窄带、低损耗滤波器.考虑到兼顾同轴线具有最大功率容量的条件为  $W/r = 1.65$ ,一般选取  $W/r = 2.0 \sim 3.0$  即可<sup>[3]</sup>.根据滤波器谐振频率  $f_0$  和介入损耗  $B_0$  的要求,即可求出满足滤波器性能指标的  $L, H$  和  $W$ .

### 2.3 滤波器的耦合特性

在讨论滤波器的耦合特性时,常常用到三个重要的参数:级间耦合系数  $k_{i,i+1}$ 、外界品质因数  $Q_e$  和频率漂移系数  $\eta$ .

$$k_{i,i+1} = (w_B/f_0)/\sqrt{g_i g_{i+1}};$$

$$Q_e = (f_0/w_B)g_0 g_1; \quad (1)$$

$$\eta_Q = (f_1 - f_0)/f_0, \quad (2)$$

式中, $g_i (i=0,1,2,\dots)$  是滤波器低通原型参数; $f_1$  代表谐振器实际谐振频率; $f_0$  代表谐振器理论谐振频率.讨论滤波器耦合特性,涉及复杂理论计

算,还要求解超越方程.为简化讨论过程,利用 HFSS 软件对滤波器模型进行模拟,以此分析滤波器结构与其性能间的对应关系.在讨论谐振器的耦合特性时,假定材料本身的品质因数  $Q_u$  无穷大.

#### 2.3.1 谐振器与外电路间的耦合

图 1 中靠近谐振器开路端面附近,有两块正方形电极作为滤波器的输入输出端口,其边长为  $a$ .谐振器与外电路间通过端口电极与谐振器内金属表面间形成的电容相互耦合.根据 HFSS 模拟结果, $Q_e, \eta$  与  $a$  之间的关系如图 2 所示.

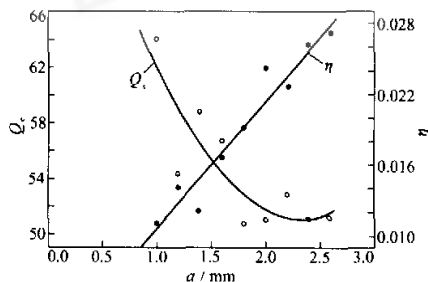


图2 外界品质因数  $Q_e$ 、频率漂移系

数  $\eta$  与端口电极宽度  $a$  的关系

谐振器与外电路间相互耦合的等效电路如图 3 所示.其中,  $C_r$  和  $L_r$  的并联回路代表无载的谐

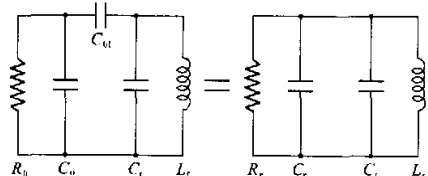


图3 介质谐振器与外电路耦合的等效电路图

振器,其谐振频率为  $f_0$ ,  $R_0$  和  $C_0$  分别代表源电阻和杂散电容,  $C_{01}$  则为谐振器与外电路间的耦合电容,  $R_e$  和  $C_e$  分别代表等效的源电阻和电容.此时回路谐振频率和外界品质因数  $Q_e$  可表示为

$$f_1 = f_0/[1 + (C_e/C_r)]^{1/2}; \quad (3)$$

$$Q_e = 2\pi f_1 (C_r + C_e) R_e.$$

因此根据式(1)~(3),  $\eta$  可表示成

$$\eta = 1 - 1/[1 + (C_e/C_r)]^{1/2}.$$

当端口电极面积增大时,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,滤波器与外电路间耦合增强,外界品质因数  $Q_e$  也随之减小;同时由于  $C_{01}$  增大,  $C_e$  也相应增大,故频率漂移系数  $\eta$  也增大.

#### 2.3.2 两个谐振器间的耦合

图 4 显示出耦合系数  $K$ 、频率漂移系数  $\eta$  与

耦合孔直径  $D$  间的关系. 两谐振器间的耦合等效电路如图 5 所示. 图 5 中, 在电路中  $L_r$  和  $C_r$  分别

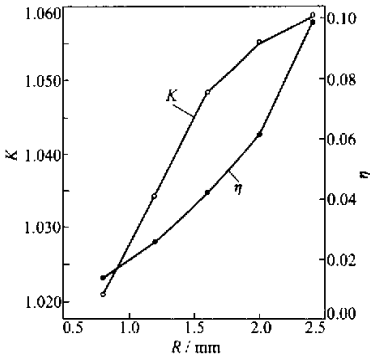


图 4 耦合系数、频率漂移系数与耦合孔直径间的关系

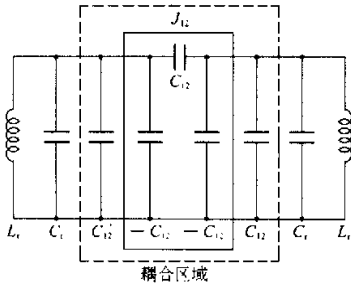


图 5 两谐振器间耦合等效电路图

是两个 1/4 波长谐振器的等效电容和电感, 其大小由谐振孔直径确定, 其所对应的谐振频率为  $f_0$ .  $J_{12}$  代表导纳变化器.  $C_{12}$  代表由两个谐振器相互耦合时使滤波器谐振频率  $f_0$  产生漂移的等效电容, 其值可以是正也可以是负, 根据频率漂移系数  $\eta$  的符号来确定. 整个虚线区域代表耦合区域. 若假定  $J_{12} = \omega C_{12}$ , 则耦合系数  $K$ , 中心频率  $f_1$  以及频率漂移系数  $\eta$  表示为<sup>[4]</sup>

$$K = C_{12}/(C_r + C_{12}) \approx C_{12}/C_r;$$
$$f_1 = f_0/[1 + (C_{12}/C_r)]^{1/2} \approx f_0[1 - (C_{12}/C_r)];$$
$$\eta = C_{12}/(2C_r).$$

由此可知, 随耦合孔直径逐渐增大, 耦合电容有效面积增大,  $C_{12}$  也相应增大, 故耦合系数  $K$  和频率漂移系数  $\eta$  也随之增加.

3 滤波器制备

所制备滤波器性能指标如下: 滤波器类型为

Chebyshev 低通原型, 0.5 dB 带内波动; 中心频率  $f_1 = 1.01$  GHz; 插入损耗  $B_0 \leq 1.5$  dB; 通带宽度  $\omega_B = 25$  MHz; 谐振器数为 2. 根据图 3 和图 4 的结果, 所制备的滤波器的耦合孔直径  $D$  以及输入输出电极宽度  $a$  如表 1 所示, 表中还列出了相应的  $\eta$  和  $K$  或  $Q_e$ . 由于耦合电容的影响, 漂移后的谐振频率

$$f_{ri} = f_0(1 + \eta_{0,1} + \eta_{1,2} + \eta_{2,3}).$$

表 1 带通滤波器结构与性能对照表

$i, i+1$	$Q_e$ 或 $K_{r, i+1}$	$D/\text{mm}$	$a/\text{mm}$	$\eta_{i, i+1}/\%$
0, 1	56.700		1.3	0.013 5
1, 2	0.025	0.9		0.018 0
2, 3	56.700		1.3	0.013 5

为了保证滤波器性能指标要求, 需要将谐振频率下移来抵消上移的频率, 频率的变化可以通过在滤波器两侧形成小槽来调整<sup>[4]</sup>. 调整以后最终带通滤波器的性能如图 6 所示, 其性能指标分

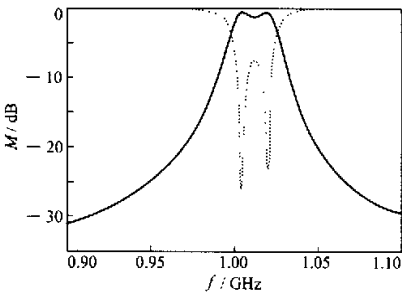


图 6 微波介质滤波器性能

别为:  $f_1 = 1.011$  GHz;  $\omega_B = 25$  MHz, 带内波动为 0.5 dB;  $B_0 = 1.2$  dB. 相应滤波器的结构参数为:  $L = 8.8$  mm,  $W = 3.6$  mm,  $H = 7.2$  mm,  $r = 1$  mm,  $D = 0.9$  mm,  $a = 1.3$  mm.

参 考 文 献

[1] 周依林, 孙晓玮. 集成 900 MHz 陶瓷介质滤波器的实现. 通信学报, 1996, 17(2): 116~120

[2] 廖承恩, 陈达章. 微波技术基础. 北京: 国防工业出版社, 1979.

[3] Hano Kazunori, Kohriyama Hiroaki, Sawamoto Ken-ichi. A direc-coupled-coaxial resonator bandpass filter for land mobile communications. IEEE Transactions on MTT, 1986, MTT-34(9): 972~976

[4] Konishi Yoshihiro. Novel dielectric waveguide components-microwave applications of new ceramic materials. Proceedings of The IEEE, 1991, 79(6): 726~740

## 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, 致力和专注于微波、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/>