

研究与试制
R & D

一种新耦合结构的介质滤波器的设计与仿真

张景, 梁飞, 吕文中, 王晓川
(华中科技大学电子科学与技术系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 设计并研究了一种电容负载型的同轴介质滤波器, 它采用新颖的耦合结构, 以及高介电常数低损耗的微波陶瓷材料, 大大减小了同轴介质滤波器的体积。同时用 HFSS 软件对其进行仿真, 讨论了部分结构参数对滤波器性能的影响, 最后设计出性能良好的带通滤波器, 其中心频率 $f_0 = 999$ MHz, 插入损耗 $L_i = 1.489$ dB, 3 dB 带宽 $B = 17$ MHz, 带外抑制在 $f_0 \pm 30$ MHz 时 > 20 dB。

关键词: 电子技术; 介质滤波器; 耦合结构; HFSS 仿真; 小型化

中图分类号: TN713[†].3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2028 (2006) 09-0025-03

Design and Simulation of Dielectric Filter with New Coupling Structure

ZHANG Jing, LIANG Fei, LU Wen-zhong, WANG Xiao-chuan

(Dept of Electronics Science and Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 43074, China)

Abstract: A kind of coaxial dielectric filters with capacitor-loaded structure was designed and studied. The resonators are coupled with a novel structure, and made of metallized microwave dielectric ceramics with high ϵ_r and low $\tan \delta$, so the volume of the filter is decreased greatly. Also used was the HFSS to simulate the structure of the filter, and found is the relationship between the properties and the parameters of the structure. Finally, got is a filter with properties of $f_0 = 999$ MHz, $L_i = 1.489$ dB, $B = 17$ MHz, attenuation > 20 dB at $f_0 \pm 30$ MHz.

Key words: electronic technology; dielectric filters; coupled structure; simulation with HFSS; miniaturization

近年来, 微波介质滤波器由于其体积小、损耗低、稳定性好以及结构简单、易于加工等特点, 而备受广大移动通信系统厂商的青睐。美国斯坦福的学者 R.D.Richtmyer 早在 1939 年就从理论上证明了, 未被金属化的高介电常数和低损耗的介质可作为微波电磁谐振器^[1], 而直到 20 世纪 70 年代, 性能符合要求的微波介质陶瓷材料的出现, 才使得介质滤波器真正得以发展^[2]。本文所要介绍的电容负载型同轴微波介质滤波器采用一种新颖的耦合方式, 使 1/4 波长同轴型滤波器的尺寸进一步得以减小, 以满足移动通信中日趋小型化的要求。

1 相关理论及设计

1.1 滤波器电路设计

所设计的滤波器主要技术指标为:

中心频率 $f_0 = 1$ GHz (± 5 MHz);
带内波动 $L_{Ar} < 0.5$ dB;
插入损耗 $L_i < 2$ dB;
3 dB 带宽 $B = 20$ MHz (± 5 MHz);
阻带抑制 > 20 dB ($f_0 \pm 30$ MHz)。

由于相对带宽小于 20%, 且允许小的带内波动, 所以选用窄带切比雪夫滤波器的设计方法。首先利用频率转换公式

$$\omega' = \frac{\omega_1}{W'} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \quad (1)$$

将带通参数转化为低通原型参数^[3]。式中低通原型的频率变量为 ω' , ω_1' 为低通原型的截止频率, 带通滤波器的频率变量为 ω , ω_2 是带通滤波器的上带边频率, ω_1 是下带边频率, $\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2}$ 是通带中心频率, $W' = (\omega_2 - \omega_1) / \omega_0$ 是带通滤波器的相对带宽。由公式算得

收稿日期: 2006-03-23 通讯作者: 吕文中

作者简介: 吕文中 (1966—), 男, 河南偃师人, 教授, 目前研究方向为微波介质陶瓷、微波铁电体、压电陶瓷等。Tel: (027)87542594;
E-mail: lwz@mil.hust.edu.cn; 张景 (1981—), 女, 新疆乌鲁木齐人, 研究生, 研究方向为微波介质滤波器。Tel: 013545396176;
E-mail: snowman1999zj@sohu.com。

$f_0\pm 30\text{ MHz}$ 所对应的低通原型的频率值为 -3.046 4 MHz 和 2.956 3 MHz , 再算出 $|\omega'/\omega_1|-1$ 的值, 查找相应的切比雪夫低通滤波器的阻带抑制特性曲线^[3], 选定 $L_{Ar}=0.5\text{ dB}$ 的一簇特性曲线, 容易看出阶数为 2 时满足阻带抑制指标。然后通过查表^[3], 找出相应的切比雪夫低通原型滤波器的元件值 $g_0、g_1、g_2、g_3$, 再通过导纳变换和频率变换得出所需的切比雪夫带通滤波器的各元件值。最终的等效电路如图 1。

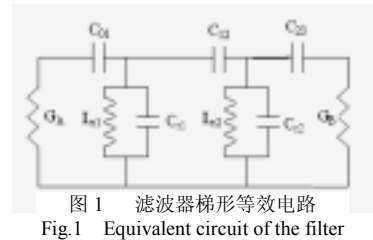


图 1 滤波器梯形等效电路
Fig.1 Equivalent circuit of the filter

1.2 终端短路四分之一波长同轴谐振器

由于传输线负载阻抗与反射系数的关系式^[4]为

$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L} \tag{2}$$

式中： Z_0 为传输线特性阻抗； Z_L 为传输线负载阻抗； Γ_L 为反射系数。终端短路时即 $Z_L=0$ 时， $\Gamma_L=-1$ ，故 $U_L^+=-U_L^-$ ， $I_L^+=I_L^-$ ，即正向传输电压与反向传输电压幅值相反，正向传输电流与反向传输电流幅值相同，则终端短路传输线上电压及电流关系为：

$$\begin{cases} U(z') = U_L^+ e^{j\beta z'} - U_L^+ e^{-j\beta z'} = j2U_L^+ \sin \beta z' \\ I(z') = \frac{2U_L^+}{Z_0} \cos \beta z' \end{cases} \tag{3}$$

$$\tag{4}$$

式中： β 为相移常数，单位为 rad/m ； z' 为线上某点到终端短路点的距离，所以终端短路的同轴线输入阻抗为 $Z_{in}=jZ_0 \tan \beta z'$ 。如图 2 所示 $z'=n\lambda/2$ ($n=0, 1, 2, \dots$) 时， $Z_{in}=0$ ，等效电路为串联谐振电路； $z'=(2n+1)\lambda/4$ ($n=0, 1, 2, \dots$) 时， $Z_{in}=\infty$ 即 $G_{in}=0$ 为并联谐振电路^[4]。

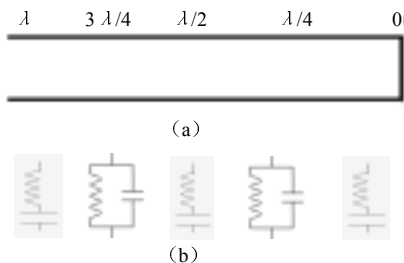


图 2 终端短路的同轴传输线及其等效电路
Fig.2 Coaxial transmission line with short terminal and its equivalent circuit

为满足微型化的要求，当 $n=0$ 时， $z'=\lambda/4$ ，尺寸最小，构成终端短路四分之一波长同轴谐振器。与图 1 的等效电路比较，其中的 LC 并联谐振电路均可由终端短路四分之一波长同轴谐振器代替。因此将介质谐振器通过电容相互耦合就能构成带通滤波器。耦合方式有很多种，例如外加电容板进行耦合，通过耦合孔进行耦合，利用阶

跃阻抗结构产生的电容进行耦合等，笔者采用的耦合方式是通过谐振孔内未涂覆电极的部分产生的负载电容而进行耦合。

2 结构设计

由以上知识作为基础，笔者设计了一种四分之一波长的电容负载型同轴介质滤波器。其结构为一个包含两个谐振孔的陶瓷独块，陶瓷块除输入输出端口周围，以及谐振孔内靠近末端的圆周间隙外，其它所有表面都涂覆电极材料，如图 3 所示，其中 $L、W、H$ 分别为陶瓷块的长、宽、高， p 为两谐振孔中心距， a 为输入输出端口距末端的距离， b 为圆周间隙距末端的距离。未涂电极的圆周间隙构成集中电容，该电容作为同轴线的末端负载，因而称此谐振腔为电容负载同轴谐振腔。两个谐振腔通过间隙电容进行耦合，同时圆周间隙使谐振器的一端开路，即形成一端开路，一端短路的长度略小于四分之一波长的同轴谐振器。输入输出端则通过与内导体形成的电容进行耦合。电磁信号从输入端通过输入电容耦合到第一个谐振腔中，再通过谐振孔中的负载电容耦合到第二个谐振孔，最后通过输出电容耦合输出。整个信号传输过程中只有谐振频率附近的电磁波可以通过，因此起到滤波的作用。

图 3 同轴介质滤波器结构图
Fig.3 Structure of the coaxial dielectric filter

实际的滤波器需要放在一个介质基板上，并通过微带线输入输出信号。笔者采用 ϵ_r 为 3.48 的介质基板，基板厚度为 0.762 mm ，为达到匹配应使微带线的特征阻抗为 $50\ \Omega$ ，令微带线宽为 1.685 mm 。

3 结构参数对性能的影响

下面用 HFSS（高频结构模拟）软件对所设计的结构进行仿真，同时找出滤波器的部分结构参数对滤波器性能的影响。

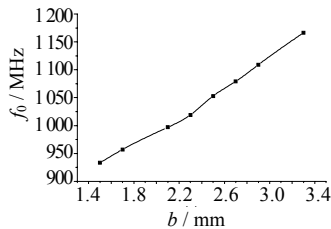


图 4 圆周间隙的位置 b 对滤波器性能的影响
Fig.4 Effects of b on properties of filter

采用 Ca-Li-Sm-Ti-O 系材料作为滤波器的体材，其 ϵ_r 为 100，1 GHz 频率下的 $\tan \delta$ 为 2×10^{-4} ，温度系数小于 $10\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；电极材

料为银电极材料。

由图 4 可见, 随着圆周间隙与滤波器末端距离的增大, 中心频率增长, 这是因为随 b 的增大, $1/4$ 波长谐振腔的长度 (即圆周间隙距滤波器前端的距离) 减小, 而中心频率又与谐振腔长度呈反比 $f_0 = c / 4\sqrt{\epsilon_r} L_r$, 因此中心频率随 b 的增大而增大。这一规律有利于设计同一尺寸不同中心频率的滤波器, 即通过改变圆周间隙的位置来调整滤波器的中心频率。

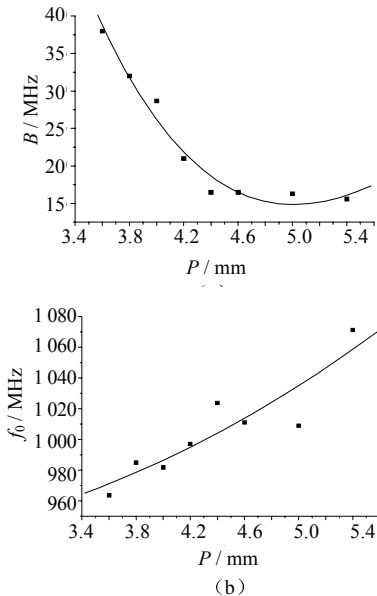


图 5 谐振孔间距 p 对滤波器性能的影响
Fig.5 Effects of p on properties of filter

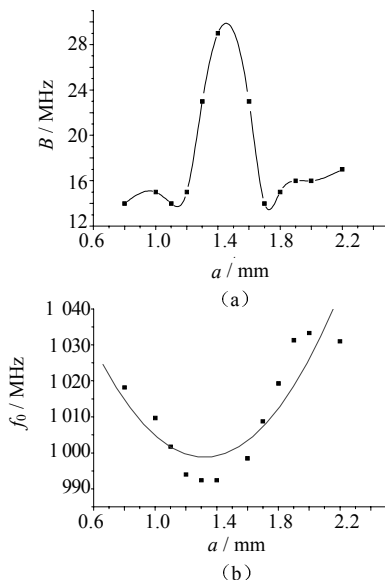


图 6 电极位置 a 对滤波器性能的影响
Fig.6 Effects of a on properties of filter

$a=1.7$ mm, $b=2.3$ mm。仿真结果为, $f_0=999$ MHz, $L_i=1.489$ dB, $B=17$ MHz, 带外抑制在 $f_0 \pm 30$ MHz 时 >20 dB。

由图 5(a) 可看出带宽随孔间距的增大而减小, 这是因为随孔间距的增大, 两谐振孔之间的能量耦合减小, 从而导致带宽的减小。由图 6(a) 可看出带宽随电极位置的变化在距末端 1.5 mm 左右时出现峰值, 这是因为电极在距末端 1.5 mm 处正好与圆周间隙的位置相对, 输入输出能量耦合最大, 所以带宽最宽。由图 5(b)、图 6(b) 可看出中心频率随耦合强度的增大而减小, 这说明此结构的滤波器是以电容耦合为主。

4 仿真结果

图 7 是用 HFSS 仿真此种结构的滤波器的仿真波形。部分结构参数为 $L=9.5$ mm, $W=7.5$ mm, $H=3.8$ mm, $p=4.4$ mm,

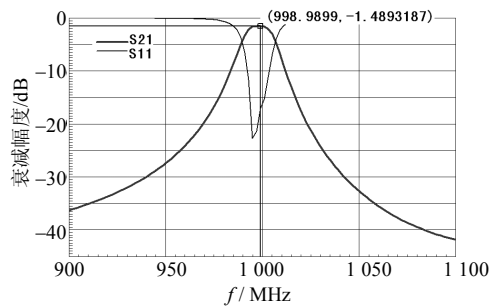


图 7 同轴介质滤波器的仿真波形
Fig.7 Results of simulation about the coaxial dielectric filter

5 结论

(1) 中心频率随着圆周间隙与滤波器末端距离的增大而增大; 带宽随孔间距的增大而减小; 带宽随电极位置的变化在距末端 1.5 mm 左右时出现峰值。

(2) 采用体材为 Ca-Li-Sm-Ti-O, 表面涂覆银电极的此种结构的电容负载型同轴滤波器性能为 $f_0=999$ MHz, $L_i=1.489$ dB, $B=17$ MHz, 带外抑制在 $f_0 \pm 30$ MHz 时 >20 dB, 各性能参数满足技术指标。

(3) 下阶段在器件的实现方面, 坯体制备工艺将采用凝胶注模成型法实现坯体成型, 此工艺可得到高品质因数的样品, 且坯体致密, 缺陷少, 组分更为均匀^[9]; 由于电极的不均匀性以及低吸附力将导致微波能量的损耗, 所以表面银电极的质量也至关重要, 陶瓷滤波器表面涂银技术笔者将采用化学镀的方法, 此方法对于体积小、形状复杂的滤波器十分适用; 此外, 制成的滤波器需要经过适当调试使其达到最佳性能。

(4) 最终的介质滤波器的体积为 9.4 mm \times 7.4 mm \times 3.8 mm, 与同性能指标的采用耦合孔进行耦合的同轴介质滤波器相比体积减小了 $1/3$, 满足目前微波器件微型化的要求, 尤其在移动通信系统中的前景更为广阔。

参考文献:

- [1] Richtmyer R. Dielectric resonators [J]. J Appl Phys, 1939, 6(10): 391—398.
- [2] 顾其铮, 梁万春. 介质滤波器微波电路[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1986. 1—3.
- [3] 甘本跋, 梁万春. 现代微波滤波器的结构与设计与[M]. 北京: 科学出版社, 1973.
- [4] 牛忠霞, 雷雪, 张德伟. 微波技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [5] 吕文中, 梁飞, 汪小红, 等. 滤波器耦合槽直径对其性能的影响仿真[J]. 压电与声光, 2005, (6): 303—305.
- [6] Matsumoto H, Ogura H, Nishikawa T. A miniaturized dielectric monoblock band-pass filter for 800MHz band cordless telephone system[J]. Microwave Symp Digest, 1994, 5(1.1): 249—252.
- [7] 吕文中, 孙建, 梁飞, 等. 低插损同轴型微波介质滤波器的设计[J]. 电子元件与材料, 2004, 23(5): 6—8.
- [8] 吕文中, 梁飞, 汪小红, 等. $1/4$ 波长同轴型微波介质滤波器的设计与仿真[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004, (4): 93—95.
- [9] 周东祥, 欧阳俊, 郑志平, 等. 微波陶瓷凝胶注模成型工艺研究[J]. 压电与声光, 2005, (6): 95—97.

(编辑: 傅成君)

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(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/>