

一种新型结构微波介质滤波器的设计及仿真

梁 飞, 吕文中, 周东祥, 朱建华

(华中科技大学 电子科学与技术系, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 详细论述了一种新型结构微波介质滤波器的设计方法, 分析了滤波器结构中耦合结构与谐振结构的相互影响关系, 根据微波网络理论计算出的微波介质滤波器结构参数值, 并采用高频结构模拟软件(HFSS)对滤波器结构进行仿真优化, 得到了性能满足要求的仿真结果, 根据仿真优化的结果制备出的微波介质滤波器其性能与设计要求的相吻合。

关键词: 微波介质滤波器; 设计; 仿真; HFSS(高频结构模拟软件)

中图分类号: TN713+.3

文献标识码: A

Design and Simulation of a New Structure Microwave Dielectric Filter

LIANG Fei, LÜ Wen-zhong, ZHOU Dong-xiang, ZHU Jian-hua

(The Dept. of Electronics Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper described a designing method of a new structure microwave dielectric filter. The relation of the coupling structure and resonating structure in the filter was analyzed, the structure parameters computed by the microwave net theory were simulated and optimized by advanced EDA tool (HFSS) and a ideal result could be acquired. According to the simulated and optimized results, the microwave dielectric filters were fabricated and their final properties was consistent with the designing request.

Key words: microwave dielectric filter; design; simulation; HFSS

在微波介质滤波器的制作过程中, 滤波器结构设计对其性能至关重要。在以前所报道的几种微波介质滤波器中^[1-3], 其耦合结构和谐振结构往往集成在一起。在设计时, 这种集成结构滤波器的结构参数值往往无法根据微波网络理论直接算出, 采用电磁场理论计算过于繁琐, 不利于微波介质滤波器的快速准确设计。在本文中提出了一种新型结构微波介质滤波器, 其耦合结构和谐振结构分离, 可以采用微波网络理论直接计算耦合结构和谐振结构的各参数值, 根据计算出的结果, 采用高频结构模拟软件(HFSS)对介质滤波器结构进一步仿真及优化, 设计出一种性能优良的微波介质滤波器。所设计出的微波介质滤波器具有体积小, 插损小的特点, 且结构简单, 调试方便, 适合大批量生产, 可广泛应用于数字通信设备。

1 滤波器设计原理

本文设计的滤波器结构如图1所示。该结构的滤波器由多个一端短路一端开路的1/4波长同轴型介质谐振器构成。介质谐振器由介电常数为100左右的微波介质陶瓷材料制备而成, 在除开路端面外其余各面均涂覆金属银电极。各谐振器之间通过在氧化铝介质基板双面涂银所形成平板电容来实现相

互耦合, 各谐振器间的耦合及滤波器与外电路的耦合以电容耦合为主。整个滤波器放置在双面敷铜的聚四氟乙烯微带基板上, 并采用金属外壳加以固定。微波信号通过微带传输线输入输出。在微波频段下, 微波介质滤波器的等效电路图如图2所示。

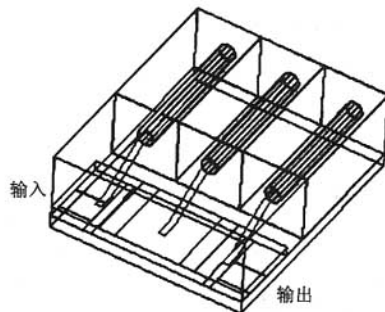


图1 微波介质滤波器结构图

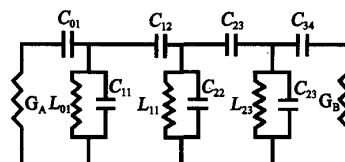


图2 电容耦合集总元件滤波器等效电路图

根据微波网络理论^[4], 对于由1/4波长同轴型介质谐振器所组成的电容耦合集总元件滤波器, 其设计公式为

收稿日期: 2005-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60001002)

作者简介: 梁飞(1975-), 男, 湖北武汉人, 讲师, 博士生, 主要从事微波介质陶瓷材料及器件的研究。

$$\begin{cases}
 \frac{\omega'}{\omega_1} = \frac{2}{W} \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega} \right) \\
 W = 2 \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2 + \omega_1} \\
 \omega_0 = \frac{2\omega_2\omega_1}{\omega_2 + \omega_1} \\
 \frac{J_{01}}{Y_0} = \sqrt{\frac{\pi W}{4g_0g_1\omega_1}} \\
 \left. \frac{J_{j,j+1}}{Y_0} \right|_{j=1 \sim n-1} = \frac{\pi W}{4\omega_1} \frac{1}{\sqrt{g_jg_{j+1}}} \\
 \frac{J_{n,n+1}}{Y_0} = \sqrt{\frac{\pi W}{4g_ng_{n+1}\omega_1}} \\
 C_{01} = \frac{J_{01}}{\omega_0 \sqrt{1 - \left(\frac{J_{01}}{G_A} \right)^2}} \\
 C_{j,j+1} \big|_{j=1 \sim n-1} = J_{j,j+1} / \omega_0 \\
 C_{n,n+1} = \frac{J_{n,n+1}}{\omega_0 \sqrt{1 - (J_{n,n+1}/G_B)^2}}
 \end{cases} \quad (1)$$

式中 ω' 为相应低通原型滤波器任一点处的频率; ω_1 为低通原型滤波器的“截止频率”; W 为带通滤波器的相对带宽; ω_0 为通带中心频率; ω_2 为上边带频率; ω_1 为下边带频率; G_A 、 G_B 分别为信号源和负载的电导; $J_{n,n+1}$ 为导纳参数; $C_{n,n+1}$ 为输入输出电容或级间耦合电容; Y_0 为特性导纳; g_i ($i=0, 1, 2, 3, \dots, n$) 为滤波器的低通原型参数值。

2 滤波器设计步骤

下面以设计一个具体的微波介质滤波器为例, 详细讨论微波介质滤波器结构设计方法。设计的滤波器性能指标为

中心频率 f_0 /MHz	900
带内插损/dB	≤ 1
相对带宽 $W/\%$	2
带内波动/dB	≤ 0.5
带外抑制 L_0 /dB	≥ 30 ($f_0 = \pm 50$ MHz)

2.1 滤波器类型的选择

根据所设计滤波器 W 为 2%, 此处选用窄带滤波器的设计方法进行设计。由于要求所设计的滤波器的带外抑制性能好, 且允许通带内有一定的带内波动, 因此选用切比雪夫低通滤波原型来进行设计。

2.2 滤波器级数的选择

根据所要设计的滤波器性能指标: $W=2\%$ 和 $f_0=900$ MHz, 通过查 0.5 dB 波纹切比雪夫低通滤波器的阻带衰减特性图可知, 当低通原型滤波器元件数 $n=3$ 时满足要求, 再由切比雪夫低通滤波器元件数值表(带内波动为 0.5 dB)可知相应的低通原型滤波器的元件数值分别为 $g_0=g_4=1.000$; $g_1=$

$g_3=1.5963$; $g_2=1.0967$ 。

2.3 滤波器插入损耗的估算

介质谐振器的插入损耗 L_A 由^[5]

$$L_A = \frac{4.343f_0}{WQ_u} \sum g_i \quad (2)$$

式中 W 为带通滤波器相对带宽; g_i ($i=0, 1, 2, 3, 4$) 为滤波器的低通原型参数; Q_u 为单谐振器的无载品质因数。在此滤波器中, $Q_u=4000$, 故滤波器 $L_A=0.31$, 满足所要设计滤波器插损要求。同时由式(2)可看出, 滤波器带宽越窄, 插入损耗 L_A 越大; 滤波器级数越多, 其插入损耗 L_A 越大, 此处为保证滤波器插入损耗最小, 故其级数选为 3 级。

2.4 计算各导纳变化器中导纳的值

将以上所求得低通滤波器元件数值 g_i ($i=0, 1, 2, 3, 4$) 代入式(1)即可求得各导纳数值为 $J_{01}=J_{34}=1.98 \times 10^{-3}$; $J_{12}=J_{23}=2.37 \times 10^{-4}$ 。

2.5 滤波器耦合结构参数值的计算

由电容与导纳间的变换关系式可求得输入、输出电容及级间耦合电容分别为 $C_{01}=C_{34}=2.21$ pF; $C_{21}=C_{23}=0.263$ pF。

在本滤波器耦合结构中, 输入输出电容以及级间耦合电容采用平板电容结构来实现, 其计算式为

$$A = \frac{C \times d}{\epsilon \times \epsilon_r} \quad (3)$$

式中 A 为平板电容面积; C 为平板电容大小; d 为平板电容间距; ϵ 和 ϵ_r 分别为真空介电常数和介质相对介电常数。

根据所求得的电容值及 A 的计算式即可求得该滤波器输入输出电容及级间耦合电容的面积分别为 $A_{01}=A_{34}=14.98$ mm²; $A_{12}=A_{23}=1.78$ mm²。

2.6 滤波器中各谐振器结构参数的计算

根据同轴型介质谐振器谐振频率与其长度 L 及介电常数 ϵ_r 的关系为

$$f = \frac{c}{4L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

式中 c 为真空光速。此处选用 ϵ_r 为 100 的微波介质陶瓷, 即可求得介质谐振器的长度 $L=8.3$ mm。在 L 一定时, 同轴谐振器具有最小衰减条件为: $a/r=3.592$ (a 为谐振器的宽度, r 为谐振孔的半径), 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。考虑到同轴线具有最大功率容量的条件为 $a/r=1.65$, 一般选取 $a/r=2.0 \sim 3.0$ ^[6]。

2.7 用 ANSOFT-HFSS 结构软件进行仿真及优化

根据第 2.1~2.6 节所计算出的滤波器结构数据, 采用高频结构模拟软件 (HFSS) 对滤波器进行

仿真,仿真后的结果如图3所示。

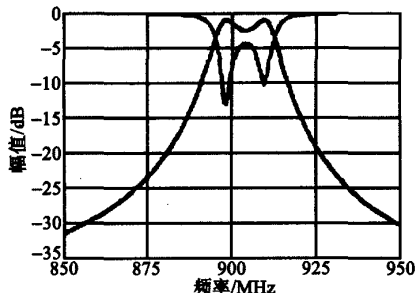


图3 根据计算结果仿真的介质滤波器性能图

由图3可知,根据微波网络理论直接计算出的滤波器结构,其性能无法满足设计要求,这是因为在计算过程中忽略了耦合与谐振结构间的相互影响。根据微波网络理论,对于图1所示结构的滤波器,其导纳等效电路图如图4所示。

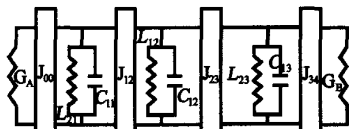


图4 滤波器含导纳结构等效电路图

将图4中的导纳变换器 $J_{i,i+1}$ 采用如图5所示的电路进行替换后,图4即变成如图2所示等效电路图。

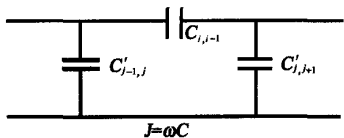


图5 串联电感耦合导纳变换器等效电路图

图5中的串联电容 $C_{i,i+1}$ 即变为图2中的耦合电容 $C_{i,i+1}$,其并联电容 $C'_{j-1,j}$ 、 $C'_{j,j+1}$ 则合并到相邻的并联谐振器的正电容内,使得电路中的总电容为正,合并后的总电容 C'_{ij} 应为 $C'_{ij} = C_{ij} - C_{j-1,j} - C_{j,j+1}$,相应每只谐振器的实际谐振频率 $f_{ij} = 1/2\pi \sqrt{L_r C'_{ij}}$ ($j=1,2,3$),即

$$\begin{cases} f_{r1} = 1/2\pi \sqrt{L_r (C_{r1} - C'_{01} - C'_{12})} \\ f_{r2} = 1/2\pi \sqrt{L_r (C_{r2} - C'_{12} - C'_{23})} \\ f_{r3} = 1/2\pi \sqrt{L_r (C_{r3} - C'_{23} - C'_{34})} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可看出,要精确设计滤波器必须求出 $C'_{j-1,j}$ 、 $C'_{j,j+1}$ 的大小,在此结构的滤波器中, $C'_{j-1,j}$ 、 $C'_{j,j+1}$ 无法直接精确求出,其大小由级间平板电容的面积 A 决定。为简化设计过程并能精确设计,在此采用高频结构模拟软件(HFSS)对滤波器结构进行仿真优化。经多次仿真优化后,耦合结构中各平板电容面积尺寸为 $A_{01} = A_{34} = 14.98 \text{ mm}^2$; $A_{12} = A_{23} = 1.65 \text{ mm}^2$ 。图6为仿真后得到的滤波器性能。万方数据

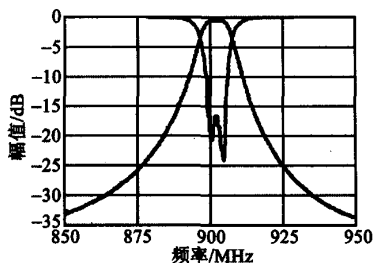


图6 经多次优化后得到的滤波器性能图

由图6可看出,优化后的滤波器插损较小,各项技术指标均能满足设计要求。根据以上设计和仿真的结果,加工了一批微波介质滤波器,经调试后滤波器性能图如图7所示,由图可知,测试结果与仿真结果非常接近,且能满足设计要求。

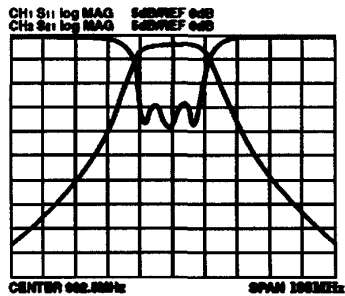


图7 根据仿真结果制作实际滤波器性能图

3 结束语

设计出一种新型结构微波介质滤波器,在此结构中,耦合结构和谐振结构分离,采用微波网络理论对其耦合结构和谐振结构参数进行计算,在此基础上采用高频结构模拟软件(HFSS)对此结构进行仿真优化,设计出性能优良的微波介质滤波器,满足实际应用需求。

参考文献:

- [1] YOU Cheng-chyi, HUANG Cheng-liang, WEI Chung-chuang, Single-block ceramic microwave bandpass filters[J]. Microwave Journal, 1994, 11: 24-35.
- [2] HANO K, KOHRIYAMA H, SAWAMOTO K I. A direct-coupled-coaxial resonator bandpass filter for land mobile communications [J]. IEEE Transactions on MTT, 1986, MTT-34, (9): 972-976.
- [3] 吕文中,梁 飞. 滤波器耦合槽直径对其性能的影响仿真[J]. 压电与声光, 2005, 27 (3): 303-305.
- [4] 甘本祚,吴万春. 现代微波滤波器的结构与[M]. 北京:科学出版社,1973.
- [5] 周依林,孙晓川. 集成 900 MHz 陶瓷介质滤波器的实现[J]. 通信学报, 1996, 17(2): 116-120.
- [6] 梁 飞,吕文中. 1/4λ 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, 2004, 32(4): 93-95.

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/>