

文章编号:1005-6122(2007)05-0029-04

# 一种新型四级叠层波导带通滤波器\*

梁飞<sup>1,2</sup> 吴志鹏<sup>2</sup> 吕文中<sup>1</sup> 周东祥<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学电子科学和技术系, 武汉 430074;  
2. 曼彻斯特大学电气与电子工程学院, 曼彻斯特 601QD, 英国)

**摘要:** 提出一种新型四级叠层介质波导谐振器滤波器的结构及其设计方法。建立三维有限分析模型讨论了二级介质波导滤波器耦合特性, 设计出二级片式介质波导谐振器滤波器。采用 LTCC 工艺叠加两块二级片式波导滤波器得到四级叠层波导滤波器, 通过三维有限元分析模型绘制出四级叠层波导滤波器耦合特性曲线。最终设计出的四级叠层波导滤波器长8.8mm、宽6.2mm、厚1.6mm, 中心频率5.2GHz, 带宽300MHz, 带内波动0.1dB, 插损0.8dB。其具有小型化、低插损以及适合表面贴装等特点, 能满足下一代 WLAN 系统应用要求。

**关键词:** 波导滤波器, 叠层, 有限元法

## A Novel Four-stage Double-layered Waveguide Bandpass Filter

LIANG Fei<sup>1,2</sup>, WU Zhi-peng<sup>2</sup>, LÜ Wen-zhong<sup>1</sup>, ZHOU Dong-xiang<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic Science and Technology, Huazhong University of  
Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, The University of Manchester, Manchester 60 1QD, UK)

**Abstract:** This paper presents a novel four-stage double-layered waveguide bandpass filter and its simulation method. The coupling characteristics are discussed by using 3-dimension finite element analysis models and a planar two-stage waveguide filter is acquired. Two two-stage waveguide filters are stacked by LTCC to compose a four-stage double-layered waveguides bandpass filter with the center frequency of 5.2 GHz and 300MHz band-pass width and 0.8dB insertion loss. The final filter of the 8.8mm length, 6.2mm width and 1.6mm height exhibits miniaturization, low insertion loss and surface mounting and meets the application requirements of next generation of WLAN system.

**Key words:** Waveguide filter, Multi-layered, Finite element method

## 引言

随着移动通讯技术的迅猛发展, 小型无线局域网系统(WLAN)(如:个人数据处理系统(PDA)、便携式电脑以及蓝牙等)逐渐成为移动通讯市场发展增长的强劲动力。然而由于频谱资源的限制, 小型 WLAN 系统目前所使用的频率集中在2.39GHz ~ 2.49GHz 波段, 导致 WLAN 系统之间相互干扰。同时随 WLAN 用户数迅速增加, 网络堵塞现象也日益严重。为了解决这一问题, IEEE802.11a 规定下一代 WLAN 系统将工作于 5 ~ 6GHz 频段范围。在 5 ~ 6GHz 高频波段, 波导谐振器与同轴及微带型谐振

器相比具有更高的品质因数, 同时在此频段范围, 介质波导谐振器尺寸已缩小到毫米级, 因而显示出巨大的应用潜力。在有关介质波导滤波器的报导中<sup>[1~2]</sup>, 多级介质波导滤波器大多按串列式排列, 这种排列方式导致介质波导滤波器在横向长度很长, 应用时在介质板上占据了很大的面积, 仍然无法满足移动通讯系统小型化的要求。当波导谐振器工作在基模( $TE_{101}$ )时, 其谐振性能与其厚度无关, 根据这个特性能制成片式介质波导谐振器。将多个片式介质波导谐振器相互叠加, 可得到多层次片式介质波导滤波器, 从而实现介质波导滤波器的小型化。在本文中, 首先建立有限元模型分析了二级介质波导滤波器耦合特性, 采用高频结构模拟软件(HFSS)讨

\* 收稿日期:2006-10-11; 定稿日期:2007-01-16

基金项目:中国留学基金委中英优秀青年学者奖学金资助(教外司欧 2005-362)

论了波导谐振器外界品质因数和输入输出端口、耦合系数与电感带之间的相互关系,设计出一种二级片式介质波导滤波器。在此基础上,采用LTCC工艺通过叠加两层二级片式波导介质滤波器而得到一种新型四级叠层介质波导谐振器滤波器。所得到的四级叠层介质波导具有小型化、低插损、适合表面贴装工艺等特征,完全满足下一代移动通讯系统要求。

## 1 二级波导滤波器结构配置

二级介质波导谐振器滤波器结构如图1所示。二级介质波导滤波器由两个工作于TE<sub>101</sub>模的1/4波长介质波导谐振器相互串联而成。对于1/4波长介质波导谐振器,除输入输出端口和电感带所在的两个面外,其余的面全部被金属银电极涂覆。输入输出端口通过微带线与外电路耦合输入输出,两谐振器之间通过金属电感带相互耦合。

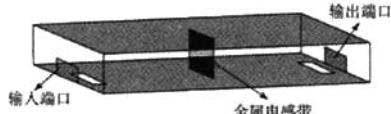


图1 二级介质波导谐振器滤波器结构图

## 2 波导滤波器耦合特性分析

分析介质波导谐振器滤波器的耦合特性时,最简单最有效的方法是三维有限元法。图2显示了用于有限元分析所提取的二端口散射矩阵分析模式图。

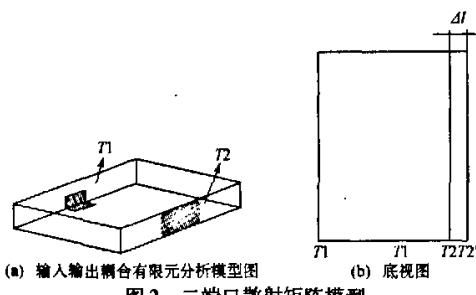


图2 二端口散射矩阵模型

由图2(b)可知,当参考面T2移动距离Δl到T2'时,此时散射矩阵S'为:

$$S' = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \cdot e^{-j\beta\Delta l} \\ S_{21} \cdot e^{-j\beta\Delta l} & S_{22} \cdot e^{-j\beta\Delta l} \end{bmatrix} \quad (1)$$

β为波导的相常数。令参考面T1端接R负载,散射参量S'可由式(2)计算:

$$S'_{22} = \frac{(Z_s + R)S'_{22} - (Z_s - R)(S'_{12}S'_{21} - S'_{11}S'_{22})}{Z_s + R + (Z_s - R)S'_{11}} \quad (2)$$

其中Z<sub>s</sub>为介质波导的特征阻抗。调整Δl使S'在5.2GHz时的相位为π,然后通过改变I/O端口宽度可得到相应的S'，外界品质因数Q<sub>e</sub><sup>[2]</sup>

$$Q_e = \frac{\pi}{2} \times \frac{1 + |S'_{22}|}{1 - |S'_{22}|} \times \left(\frac{\lambda_{se}}{\lambda_0}\right)^2 \quad (3)$$

其中,λ<sub>se</sub>为介质波导波长,λ<sub>0</sub>为自由空间波长。图3显示了外界品质因数Q<sub>e</sub>与端口电极宽度W的关系。

滤波器的级间耦合系数K<sub>i,i+1</sub>(i=1,2,...)为<sup>[3]</sup>

$$K = \frac{2|f_o - f_e|}{f_o + f_e} \quad (4)$$

f<sub>o</sub>为奇模谐振频率,f<sub>e</sub>为偶模谐振频率。

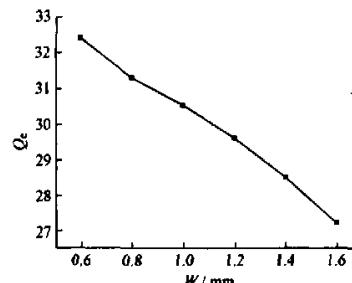


图3 外界品质因数Q<sub>e</sub>与端口电极宽度W关系图



图4 耦合系数有限元分析模型图

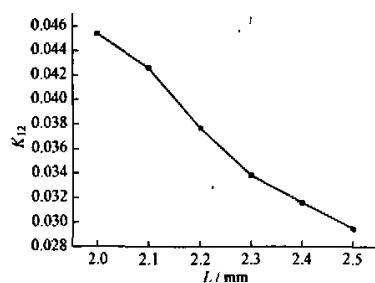


图5 耦合系数K<sub>1,2</sub>与电感带宽度L关系图

计算介质波导谐振器耦合系数时所采用的有限元分析模型如图4所示。首先设T1面为理想磁面(PMW),当整个T2面设为理想电面(PEW)时,所获得的谐振频率为奇模谐振频率f<sub>o</sub>;当T2面中的非阴影部分(即未金属化部分)设为理想磁面(PMW)时,此时所获得的谐振频率为偶模谐振频率f<sub>e</sub>。根据式(4)即可计算出耦合系数。当电感带(即阴影部分)宽度取不同值时,可得到相应的耦合系数数值。滤波器耦合系数K<sub>1,2</sub>与电感带宽度L之间的关系如图5所示。

### 3 二级波导滤波器设计

所要设计的二级波导滤波器性能指标如下:滤波器类型:Chebyshev低通原型。其带内波动 $0.1\text{dB}$ ,中心频率 $f_0 = 5.2\text{GHz}$ ,插入损耗: $IL \leq 1.5\text{dB}$ ,通带宽度 $BW = 140\text{MHz}$ ,带外抑制 $LA \geq 20\text{dB}$ ( $\pm 300\text{MHz}$ )。介质波导滤波器采用相对介电常数 $\epsilon_r = 30$ 、无载品质因数 $Q_u = 8000(5.0\text{GHz})$ 、谐振频率温度系数 $\tau_f = 5\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 的微波介质陶瓷材料制备而成。

当 $1/2\lambda$ 波导谐振器工作于 $\text{TE}_{101}$ 模式时,其长度 $a$ 与宽度 $d$ 可根据文献[4]得出。

$$f_{101} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{d}\right)^2} \quad (4)$$

其中, $c$ 为真空中的波速, $\epsilon_r$ 为相对介电常数。根据式(4)求得 $a = 8.8\text{mm}$ , $d = 6.2\text{mm}$ 。由于工作于 $\text{TE}_{101}$ 模式的波导谐振器谐振频率与其厚度无关,同时为了满足下一步叠层要求,此处取 $1/4$ 波长波导谐振器厚度为 $0.8\text{mm}$ 。

根据文献[5],带通滤波器可以根据其外界品质因数 $Q_e$ 和耦合系数 $K_{i,i+1}$ 进行设计,其表达式分别为

$$Q_e = \frac{1}{k_{0,1}^2} = (f_0/BW) \cdot g_0 g_1 \quad (6)$$

$$k_{i,i+1} = (BW/f_0)/\sqrt{g_i g_{i+1}} (i = 1, 2, \dots) \quad (7)$$

$f_0$ 为所要设计的滤波器的中心频率, $BW$ 为其通带宽度, $g_i$ 为低通原型滤波器元件值。根据式(6)和(7),可得到所要设计的二级波导滤波器外界品质因数 $Q_e = 31.3$ ,耦合系数 $K_{1,2} = 0.037$ 。根据图3与图5可得到相应的输入输出端口宽度 $W = 0.8\text{mm}$ ,电感带宽度 $L = 2.2\text{mm}$ 。

二级介质波导滤波器最终频率响应如图6所示, $f_0 = 5.2\text{GHz}$ , $BW = 140.5\text{MHz}$ ,带内波动为 $0.1\text{dB}$ , $IL = 0.8\text{dB}$ 。

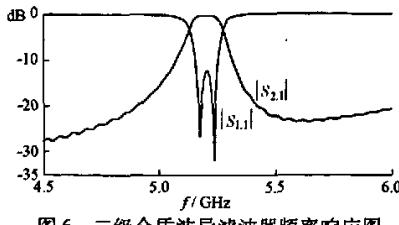


图6 二级介质波导滤波器频率响应图

### 4 四级叠层波导滤波器

四级叠层式介质波导谐振器滤波器结构如图7所示。它由上下两块二级介质波导滤波器相互叠加

并通过低温共烧工艺(LTCC)而组合在一起。上下相邻的两个 $1/4$ 波长波导谐振器之间通过电感窗相互耦合,左右相邻的两个谐振器之间则通过电感带相互耦合。在底层的两个谐振器上设置矩形电极端口,电极端口通过微带线与外电路耦合输入输出信号。四级叠层波导谐振器滤波器电场与磁场分布图分别如图8和图9所示。

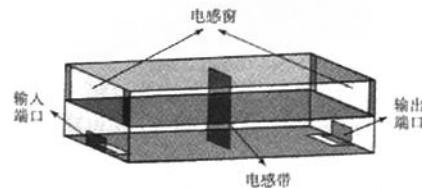


图7 四级叠层波导谐振器滤波器结构示意图

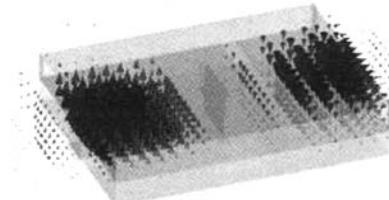


图8 四级叠层波导谐振器滤波器电场分布图

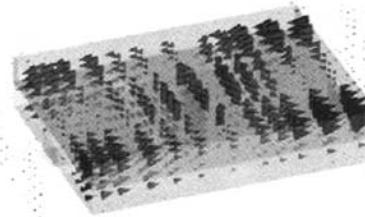


图9 四级叠层波导谐振器滤波器磁场分布图

### 5 四级波导滤波器耦合特性分析

对于四级波导滤波器而言,其输入输出谐振器耦合矩阵也为二端口散射矩阵。图10显示了用于四级叠层滤波器有限元分析所提取的二端口散射矩阵分析模式图。根据公式(2)和(3),外界品质因数 $Q_e$ 与输入输出端口宽度 $W$ 之间的相互关系如图11所示。

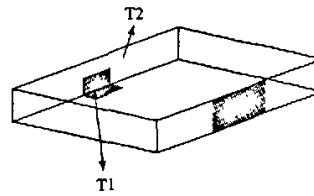
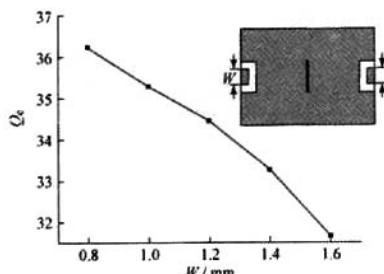


图10 叠层滤波器输入输出耦合有限元分析模型图

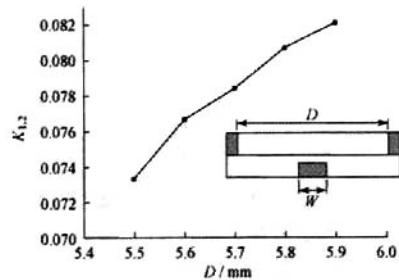
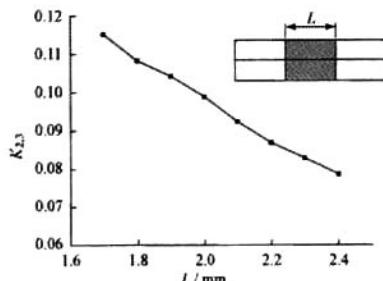
分析四级叠层波导谐振器滤波器的级间耦合

图 11  $Q_s$  与  $W$  关系曲线图

特性时,可以采用与二级波导滤波器相似的有限元分析模型。由此可得耦合系数  $K_{1,2}$  与电感窗的长度  $D$  以及耦合系数  $K_{2,3}$  与电感带长度  $L$  之间关系分别如图 12 和图 13 所示。

## 6 四级叠层波导滤波器设计

所要设计的四级叠层介质波导谐振器滤波器性能指标如下:滤波器类型为 Chebyshev 低通原型,带内波动 0.1dB;中心频率  $f_0 = 5.2\text{GHz}$ ;插入损耗  $IL \leq 1.5\text{dB}$ ;通带宽度  $BW = 300\text{MHz}$ ;谐振器数目:4。

图 12  $K_{1,2}$  与  $D$  的关系曲线图图 13  $K_{2,3}$  与  $L$  的关系曲线图

将所要设计的滤波器的中心频率和带宽值分别代入公式(6)和(7),即可求得外界品质因数  $Q_s$  和耦合系数  $K_{i,i+1}$  分别为:  $Q_s = 34.5$ ,  $k_{1,2} = 0.081$ ,  $k_{2,3} = 0.096$ 。根据图 11、图 12 和图 13,即可求出相应的耦合结构尺寸为:  $W = 1.2\text{mm}$ ,  $D = 5.8\text{mm}$  以及  $L = 2.0\text{mm}$ 。图 14 显示了四级叠层波导谐振器滤波器频率响应图。由图 14 可知,四级叠层波导滤波器

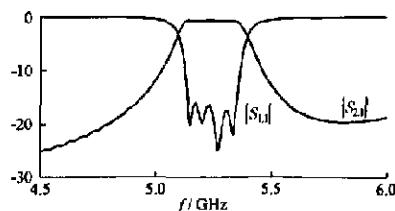


图 14 四级叠层波导滤波器频率响应图

性能如下:中心频率:  $f_0 = 5.2\text{GHz}$ , 通带宽度:  $BW = 300\text{MHz}$ , 带内波动: 0.1dB, 插入损耗:  $IL = 0.8\text{dB}$ , 其性能满足设计要求。

## 7 结论

本文介绍了一种新型四级叠层波导介质谐振器滤波器结构及其设计方法。设计出的四级叠层波导滤波器长 8.8mm, 宽 6.2mm, 高 1.6mm, 中心频率为 5.2GHz, 通带宽度 300MHz, 带内波动 0.1dB, 插入损耗 0.8dB。四级叠层波导滤波器具有多级数、小型化、低插损特征,能满足下一代 WLAN 系统要求。

## 参 考 文 献

- [1] Konishi Yoshihiro, Konno Ken-ichi, Awai Ikuo. Novel dielectric waveguide components. IEEE Trans on Broadcasting, 1988, 34(1): 2~8
- [2] Sano Kazuhisa, Miyashita Meiji. Dielectric waveguide filter with low profile and low insertion loss. IEEE Trans Microwave Theory Tech., 1999, 47(12): 2299~2303
- [3] Dishal M. Alignment and Adjustment of Synchronously Tuned Multiple-Resonant Circuit Filter. Proc. IRE, 1962, 50: 299~311
- [4] Chang Chi-Yang, Hsu Wei-Chen. Novel Planar, Square-shaped, Dielectric-Waveguide, Single-, and Dual-Mode Filters. IEEE Trans Microwave Theory Tech., 2002, 50(11): 2527~2536
- [5] Matthaei G L, Young L, Jones E M T. Microwave filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures. Norwood, MA: Artech House, 1980

梁飞 讲师,博士研究生。英国曼彻斯特大学电气与电子工程学院微波与毫米波设计与应用中心访问学者,从事微波介质滤波器和天线的研究工作。

E-mail: afeliang@hotmail.com

吴志鹏 教授,博士。英国曼彻斯特大学电气与电子工程学院微波及毫米波设计与应用中心创建人之一,多年从事微波传感器及成像系统,介质天线设计及建模,波的传播及与物质的相互作用,射频及微波电路的研究及教学工作,IEEE, IEEE 资深会员,电磁学会特邀工程师,IEEE 和 IEEE 评审人。

## 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/>