

doi: 10.3969/j. issn. 1007-2861. 2011. 02. 007

# 一种基于耦合矩阵的新型带通滤波器

高山, 肖中银, 陈文峰

(上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200072)

**摘要:** 提出一种新型的具有2个传输零点的微带带通滤波器(bandpass filter, BPF). 该滤波器采用2个新型慢波谐振器, 具有较宽的上阻带带宽. 该滤波器设计简单, 由于利用“ $N+2$ ”耦合矩阵的方法而呈现出较高的频率选择性. 测量结果表明, 该滤波器具有良好的响应特性, 在中心频率2.4 GHz处的插入损耗为1.66 dB, 上阻带频率达到7.0 GHz. 实测和仿真结果具有良好的一致性.

**关键词:** 带通滤波器; 慢波谐振器; 耦合矩阵; 传输零点

中图分类号: TN 713

文献标志码: A

文章编号: 1007-2861(2011)02-0143-04

## A Novel Bandpass Filter Based on Coupling Matrix

GAO Shan, XIAO Zhong-yin, CHEN Wen-feng

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** A novel microstrip bandpass filter (BPF) with two transmission zeros is presented. This filter has a wide upper stopband by using two novel slow-wave resonators. With an “ $N+2$ ” coupling matrix method, the filter is easy to design and has high frequency selectivity. Measured results show that the filter has good response performances including low insertion loss of 1.66 dB at the center frequency 2.4 GHz, and upper stopband frequency up to 7.0 GHz. These are in good agreement with simulation.

**Key words:** bandpass filter (BPF); slow-wave resonator; coupling matrix; transmission zero

随着通信技术的快速发展, 具有小型化、宽阻带、高频率选择性等特点的高性能微波滤波器受到了广泛的关注. 改变滤波器的拓扑结构和谐振器结构, 是常用的2种提高滤波器性能的方法. 在拓扑结构方面, 关于滤波器传输零点的研究十分重要. 对于 $N$ 阶滤波器, 人们普遍研究的是源与负载分别耦合到单个谐振器的滤波器<sup>[1-2]</sup>, 这种情况最多只能产生 $N-2$ 个有限传输零点. 而文献[3-4]的研究表明, 引入源与负载之间的耦合后,  $N$ 个谐振器最多能产生 $N$ 个有限传输零点. 另外, Cameron<sup>[5]</sup>和 Rosenberg

等<sup>[6]</sup>提出并改善了基于广义切比雪夫函数的规范“ $N+2$ ”耦合矩阵综合方法, 为更多拓扑结构的研究提供了理论依据.

在谐振器结构方面, 为了改善滤波器的带外抑制特性, 常用的方法是利用阶跃阻抗谐振器或者慢波谐振器结构来实现宽阻带<sup>[7-9]</sup>. 此外, 文献[10]中还提出用L形馈线结构来实现谐波抑制. 尽管传统的慢波谐振器具有小型化和宽阻带的优点, 但这些滤波器的馈线和谐振器之间的耦合较弱, 导致外部品质系数较高, 设计的灵活性较差. 此外, 在这些改

进技术中没有具体的理论公式来确定传输零点的位置,增加了调试的难度。

本工作提出一种新型的应用于2.4 GHz无线局域网系统的二阶滤波器。2个新型慢波谐振器及其相应的馈线结构可以方便地调节外部品质系数。同时,引入源和负载之间的耦合能够实现2个可控的传输零点。由于采用了“N+2”耦合矩阵的方法,该滤波器易于设计和优化。测量与仿真结果表明,该滤波器能够实现较高的频率选择性和较宽的上阻带带宽。

## 1 滤波器设计

滤波器的结构示意图如图1(a)所示,该示意图基于图1(b)所示的拓扑结构。根据“N+2”耦合矩阵方法和新型慢波谐振器结构分析,确定其最终优化尺寸为 $L=0.6$  mm,  $L_1=1.5$  mm,  $L_2=5.2$  mm,  $L_3=8.4$  mm,  $L_4=1.7$  mm,  $W_1=0.4$  mm,  $W_2=0.6$  mm,  $W_3=1.8$  mm,  $W_4=1.2$  mm,  $S_1=1.2$  mm,  $S_2=0.4$  mm,  $S_3=0.2$  mm。介质板相对介电常数为2.78,厚度为0.8 mm。输入、输出馈线与谐振器之间的耦合缝隙宽度为0.2 mm,  $50\Omega$ 输入、输出端口的宽度为2.1 mm。

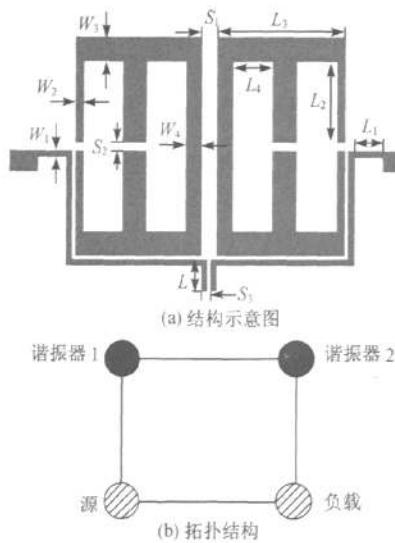


图1 滤波器结构  
Fig. 1 Geometry of the filter

### 1.1 “N+2”耦合矩阵

根据文献[5]中的推导方法,首先综合得出基于广义切比雪夫函数的“N+2”耦合矩阵。由于耦合结构呈现出对称性,耦合矩阵中的对称元素源与谐振器1之间的耦合 $M_{s1}$ 等于负载与谐振器2之间的

耦合 $M_{2L}$ ,直接的源与负载之间的耦合 $M_{SL}$ 具有容性耦合特性,因此, $M_{SL} < 0$ 。根据实际应用中对滤波器性能的要求,设置带内回波损耗为-25 dB,2个对称传输零点分别位于归一化频率 $\pm j10$ 处。综合得到的耦合矩阵

$$M = \begin{pmatrix} 0 & 1.398 & 0 & -0.044 \\ 1.398 & 0 & 2.168 & 0 \\ 0 & 2.168 & 0 & 1.398 \\ -0.044 & 0 & 1.398 & 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

相应的归一化频率响应如图2所示。有限位置传输零点的个数直接依赖于耦合网络的拓扑结构,它们的具体位置由不同耦合系数的符号和幅值决定<sup>[11]</sup>。

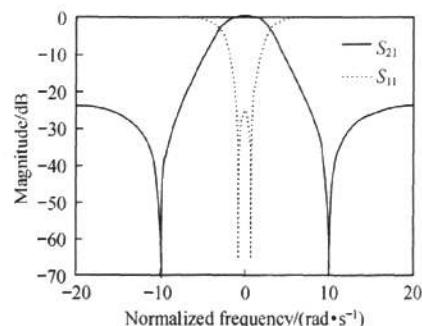


图2 归一化频率响应

Fig. 2 Normalized frequency response

### 1.2 新型慢波谐振器

图3(a)所示为本工作所提出的新型慢波谐振器的结构,2个相对的开路枝节加载于慢波谐振器的内部,得到更加紧凑的结构。该慢波谐振器在开路端电场占优,闭合端磁场占优。与图3(b)所示的传统的慢波谐振器相比,新型慢波谐振器的开路端宽度尺寸较小,因此,其电场较强,与馈线之间的耦合较强,配合相应的馈线结构能够实现较小的外部品质系数。

根据文献[12]中的分析,耦合系数 $K_{ij}$ 和外部品质系数 $Q_e$ 可以由以下2个公式确定:

$$K_{ij} = w \cdot M_{ij}, \quad (2)$$

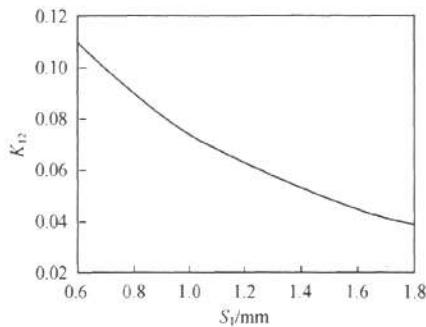
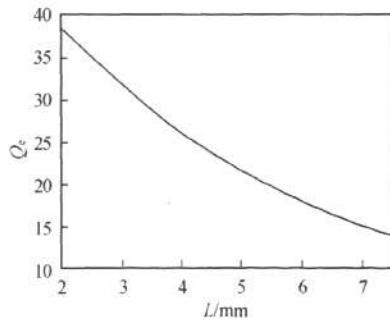
$$Q_e = \frac{1}{w \cdot M_{ij}^2}, \quad (3)$$

式中, $w$ 为带通滤波器的分数带宽。图4所示为2个谐振器之间的耦合系数 $K_{12}$ 随耦合距离 $S_1$ 的变化情况。图5为外部品质系数 $Q_e$ 随耦合长度 $L$ 的变化情况。根据图4和图5,可以方便地得出符合耦合矩阵元素大小的相应滤波器尺寸。本工作所用的仿真工具为基于矩量法的Sonnet电磁仿真软件。



图3 慢波谐振器结构

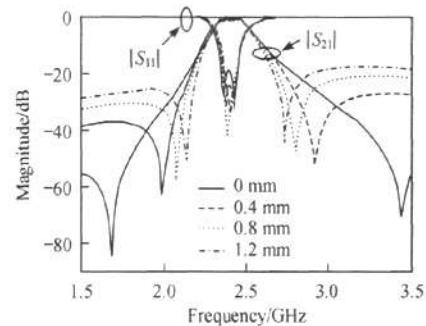
Fig. 3 Geometry slow-wave resonator

图4 耦合系数  $K_{12}$  随耦合距离  $S_1$  的变化曲线Fig. 4 Coupling coefficient  $K_{12}$  vs. coupling gap  $S_1$ 图5 外部品质系数  $Q_e$  随耦合长度  $L$  的变化曲线Fig. 5 External quality factor  $Q_e$  vs. coupling length  $L$ 

## 2 仿真与测试结果

滤波器的中心频率由谐振器的大小和开路枝节

的位置决定.按照无线局域网中 IEEE 802.11a/b 的标准,本研究将滤波器的中心频率设定在 2.4 GHz.根据上述“ $N+2$ ”耦合矩阵理论,引入源与负载之间的容性耦合.在不同的耦合长度  $L$  下,滤波器的频率响应发生了较为明显的变化,如图 6 所示.当  $L$  从 0 mm 增大到 1.2 mm 时,通带内的回波损耗逐渐减小,阻带的传输零点逐渐靠近通带,从而两边的过渡带获得了尖锐的频率选择性.同样,仿真得到的响应特性也可以通过改变公式(1)中  $M_{SE}$  的大小进行理论验证.

图6 不同耦合长度  $L$  下频率响应的变化曲线Fig. 6 Frequency responses for various coupling length  $L$ 

滤波器实物如图 7 所示.使用 Agilent 8722ES 型矢量网络分析仪测量该滤波器的  $S$  参数,测量结果和仿真结果如图 8 所示.测量结果表明,该滤波器具有带内 -24 dB 的回波损耗,最小为 1.66 dB 的插入损耗,3.3% 的分数带宽,达到了 7.0 GHz 优于 -20 dB 的带外抑制水平.从图 8 中可以清楚地看到,2 个传输零点分别位于 2.01 和 2.88 GHz 频率处,相应的抑制水平分别为 -56 和 -41 dB,这使得过渡带具有较高的频率选择性.插入损耗主要来自于 SMA (small a type) 接头、传导和介质损耗.

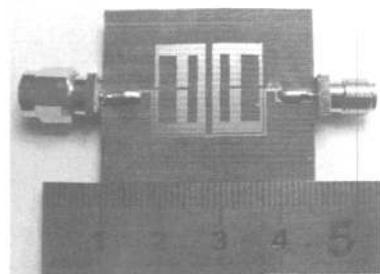


图7 滤波器实物图

Fig. 7 Photograph of the fabricated filter

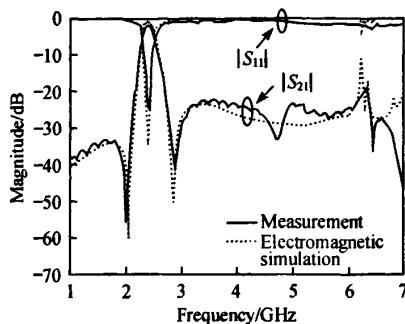


图8 实测和仿真频率响应

Fig.8 Measured and simulated frequency responses

### 3 结束语

本工作采用新型的慢波谐振器结构,设计了一种工作于2.4 GHz的微带带通滤波器。由于利用“ $N+2$ ”耦合矩阵分析方法,这种滤波器易于设计和优化。测试结果表明,该滤波器具有良好的响应特性,包括通带内较低的插入损耗、良好的频率选择性以及较宽的上阻带带宽。实测结果和仿真结果具有良好的一致性,从而验证了设计的可靠性。因此,该滤波器及其设计方法非常适用于无线局域网系统。

### 参考文献:

- [1] AHN C S, LEE J, KIM Y S. Design flexibility of an open-loop resonator filter using similarity transformation of coupling matrix [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005, 15(4):262-264.
- [2] CHEN Y M, CHANG S F, CHANG C C, et al. Design of stepped-impedance combline bandpass filters with symmetric insertion-loss response and wide stopband range [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007, 55(10):2191-2199.
- [3] ZHANG X C, YU Z Y, XU J. Design of microstrip dual-mode filters based on source-load coupling [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2008, 18(10):677-679.

- [4] WANG Y X, WANG B Z, WANG J P. The design of coupled resonator bandpass filter with wide stop-band [J]. Microwave and Wireless Components Letters, 2008, 18(4):251-253.
- [5] CAMERON R J. Advanced coupling matrix synthesis techniques for microwave filters [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(1):1-10.
- [6] ROSENBERG U, AMARI S. Novel coupling schemes for microwave resonator filters [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(12):2896-2902.
- [7] TANG C W, CHEN M C. Wide stopband parallel-coupled stacked SIRs bandpass filters with open-stub lines [J]. Microwave and Wireless Components Letters, 2006, 16(12):666-668.
- [8] CHANG Y C, KAO C H, WENG M H. Design of the compact wideband bandpass filter with low loss, high selectivity and wide stopband [J]. Microwave and Wireless Components Letters, 2008, 18(12):770-772.
- [9] HONG J S, LANCASTER M J. Microstrip filters for RF/microwave application [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2001:392-404.
- [10] HUANG X D, CHENG C H. A novel microstrip dual-mode bandpass filter with harmonic suppression [J]. Microwave and Wireless Components Letters, 2006, 16(7):404-406.
- [11] AMARI S, ROSENBERG U, BORNEMANN J. Adaptive synthesis and design of resonator filters with source/load-mutiresonator coupling [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(8):1969-1978.
- [12] CAMERON R J, KUDSIA C M, MANSOUR R R. Microwave filters for communication systems: fundamentals, design, and applications [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2007:516-518.

(编辑:赵宇)

## 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>