

一种新型双环双模带通滤波器

褚 瑞,周 亮,毛军发

(上海交通大学微波与射频技术研究中心,上海 200240)

摘 要: 本文提出了一种由一个环形谐振器和一个微扰小环构成的新型双环双模带通滤波器.微扰小环具有两个可调参数,增加了调整双模的自由度,从而更容易地调节双模,便于实现滤波器的小型化.抽头输入输出耦合结构可以方便地调整双模滤波器的两个传输零点,从而改善滤波器的通带特性.最后实现了中心频率为 2.41GHz,相对带宽为 17.77% 的双环双模带通滤波器,通带内插入损耗为 0.67dB,回波损耗为 17dB,且带外衰减大于 20dB.

关键词: 带通滤波器; 双模; 双环

中图分类号: TN713 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 03-0668-04

A Novel Double Loop Dual-Mode Bandpass Filter

CHU Rui, ZHOU Liang, MAO Jun-fa

(Center for Microwave and RF Technologies, Shanghai 200240, China)

Abstract: A novel double loop dual-mode bandpass filter is proposed which is composed of a quadrate resonator and a small quadrate loop for the purpose of perturbation. The small quadrate loop has two tunable parameters which increase the degree of freedom of dual modes and make the miniaturization easier. Tapped coupling can be used to change the transmission zeros so that the performance of filter is improved. A prototype filter is designed and fabricated with a measured center frequency of 2.41GHz, 17.77% fractional bandwidth, a low passband insertion loss of 0.67dB, a high passband return loss of 17dB and a wide stop band with rejection better than 20dB.

Key words: bandpass filter; dual mode; double loop

1 引言

随着通信技术的不断发展,滤波器在无线通信设备中起着越来越重要的作用.小的尺寸和低的插损是目前滤波器研究的热点.无线通信系统中的带通滤波器不仅要尺寸小、插损低,同时还要有良好的带外抑制.滤波器的小型化主要有三个途径:采用高介电常数的材料,选择滤波器形状以及采用多模谐振器.1972年 Wolff 提出了微带环形双模滤波器,它具有体积小,性能好,质量轻等优点^[1].双模谐振特性是指一个结构对称的谐振器在对称面上引入微扰而使得一对简并模式分开,从而等效为两个调谐电路,因此滤波器的固有阶数减少一半,使尺寸减小^[2].基于阶梯阻抗谐振器的环形双模带通滤波器具有尺寸小,辐射损耗低的优点^[3],当微扰电长度为 30°时,滤波器带宽仅为 2%.方环形双模谐振器中加入容性的开环负载支节能够降低滤波器的尺寸^[4],带内最小插损为 2.9dB,带宽仅为 1.4%,且结构复杂设计难度大.方环形谐振器的四个拐角处均加入微扰,调节四个微扰的结构和尺寸可以分别实现椭圆双模滤波器和切

比雪夫双模滤波器^[5].在方环形谐振器的四个拐角加入树状支节,改善了带外特性^[6],但相对带宽仅为 1.5%.利用容性阶梯阻抗谐振器设计的双模滤波器能够降低体积并改善带外抑制^[7],带内最小插损为 4.46dB.基于弯曲谐振器结构的双模带通滤波器,具有尺寸小的优点并且对称输入输出耦合结构便于器件集成^[8],带内最小插损为 2.04dB,相对带宽为 3.4%.多弧形的双模带通滤波器在降低尺寸的同时也能得到较好的带外抑制^[9].在谐振器的对称面上引入两个尺寸不同的微扰能够降低通带插损,同时源和负载的耦合使得滤波器具有更好的选择性^[10].

本文提出了一种新型的 2.4GHz 双环双模带通滤波器,双环滤波器由一个环形的谐振器和一个微扰小环构成.新型的微扰小环结构具有长度和高度两个可调节参数,增加了调整双模的自由度,从而可以更容易的调整双模,便于器件的小型化.抽头输入输出耦合结构便于调整滤波器的传输零点,从而改善带外特性.文中首先分析了环形谐振器的等效电路,研究了微扰小环对谐振模式的影响,其次研究了输入输出激励位置对滤波器传

输零点的影响,计算和仿真结果表明通过调节环形微扰的尺寸可以调节双模谐振器的两个模式,同时调节激励位置可以使两个传输零点关于滤波器中心频率对称.实测结果表明,新型的双环双模带通滤波器的中心频率为 2.41GHz,3dB 相对带宽为 17.77%,通带内插入损耗为 0.67dB,回波损耗为 17dB,带外衰减大于 20dB.可见该滤波器具有通带内插损小、相对带宽较宽,带外抑制好的优点.

2 双环双模滤波器分析

图 1 所示为双环双模带通滤波器结构,它由全波长环形谐振器和微扰小环构成.微扰小环结构具有长度和高度两个可调节参数,增加了调整双模的自由度.双环双模带通滤波器采用左右对称抽头耦合的输入输出结构,其位置影响入射波的两条传输路径,从而改变传输零点的位置.

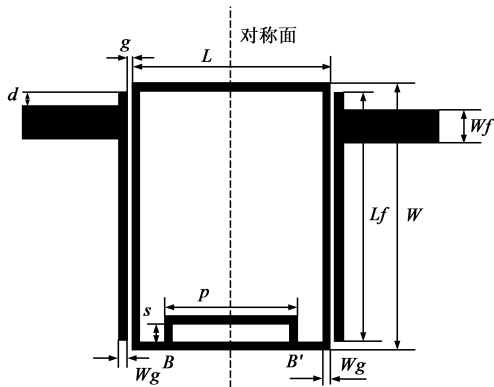


图1 双环双模带通滤波器

2.1 双模的谐振频率

图 2 所示是直接的抽头连接的滤波器奇偶模等效电路,在中心频率处, \$\theta_0\$ 是输入(输出)端到对称面的电长度, \$\theta_1\$ 是输入(输出)端到微扰小环 \$B(B')\$ 点的电长度, \$\theta_2\$ 是微扰小环 \$B(B')\$ 点到对称面的电长度,且 \$\theta_0 + \theta_1 + \theta_2 = \pi\$。\$\theta_3\$ 是中心频率处微扰小环一半的电长度,高度 \$s\$ 的电长度等于 \$\theta_3 - \theta_2\$, 长度一半 \$p/2\$ 的电长度等于 \$\theta_2\$, 设偶模频率为 \$f_{\text{even}}\$, 奇模频率为 \$f_{\text{odd}}\$, 中心频率为 \$f_c\$, 归一化偶模和奇模频率为 \$f_{\text{ne}} = f_{\text{even}}/f_c, f_{\text{no}} = f_{\text{odd}}/f_c\$。

当负载 \$Z_L\$ 开路时,图 2 为偶模等效电路,谐振条件为: \$Y_{\text{ine}} = 0\$, 则偶模谐振频率满足下式

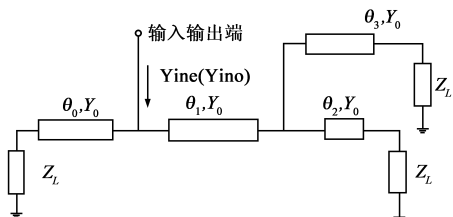


图2 环形谐振器的奇偶模等效电路

$$\frac{\tan(\theta_1 f_{\text{ne}}) + \tan(\theta_2 f_{\text{ne}}) + \tan(\theta_3 f_{\text{ne}})}{1 - \tan(\theta_1 f_{\text{ne}}) [\tan(\theta_2 f_{\text{ne}}) + \tan(\theta_3 f_{\text{ne}})]} + \tan(\theta_0 f_{\text{ne}}) = 0 \quad (1)$$

当负载 \$Z_L\$ 短路时,图 2 为奇模等效电路,谐振条件为: \$Y_{\text{ino}} = 0\$, 则奇模谐振频率满足下式

$$\frac{1}{\tan(\theta_0 f_{\text{no}})} + \frac{\tan(\theta_2 f_{\text{no}}) + \tan(\theta_3 f_{\text{no}}) - \tan(\theta_1 f_{\text{no}}) \tan(\theta_2 f_{\text{no}}) \tan(\theta_3 f_{\text{no}})}{\tan(\theta_2 f_{\text{no}}) \tan(\theta_3 f_{\text{no}}) + [\tan(\theta_2 f_{\text{no}}) + \tan(\theta_3 f_{\text{no}})] \tan(\theta_1 f_{\text{no}})} = 0 \quad (2)$$

图 2 中环形谐振器电长度保持 \$\pi\$ 不变,分别研究微扰小环长度、高度对双模的影响.图 3 所示为高度 \$s\$ 的电长度选定为 \$5^\circ\$, 长度 \$p\$ 取不同值时双模的谐振频率,图中表明随着长度 \$p\$ 的增大,奇模频率逐渐升高,偶模频率逐渐降低,同时双模的耦合系数也增大,其中耦合系数由 \$K = (f_{\text{odd}} - f_{\text{even}})/(f_{\text{odd}} + f_{\text{even}})\$ 计算得到.长度 \$p\$ 的电长度 \$2\theta_3\$ 选定为 \$10^\circ\$ 时,利用式(1)和(2)计算高度 \$s\$ 从 \$5^\circ\$ 变化到 \$25^\circ\$ 时双模的谐振频率,结果表明奇模频率为 2.42GHz 保持不变,而偶模频率从 2.28GHz 降低到 2.07GHz,同时双模的耦合系数从 0.03 增加到 0.078.

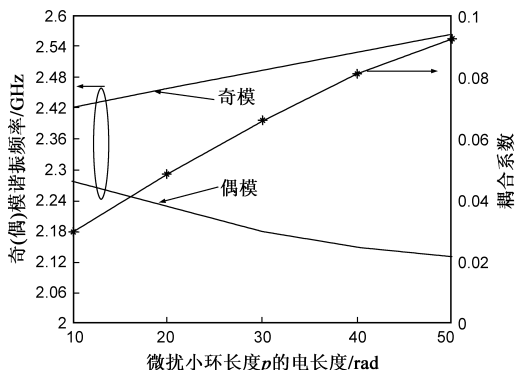


图3 微扰小环长度 \$p\$ 对双模频率的影响

2.2 双环双模滤波器的传输零点

双环双模滤波器的输入输出之间有两条传输路径,在某一频率时输出端电流反相从而互相抵消,因此产生了传输零点.在传输零点处,满足传输系数 \$S_{21} = 0\$, 利用图 2 奇偶模等效电路计算传输系数,公式^[2]如下:

$$S_{21} = (Y_{\text{ino}} Y_0 - Y_{\text{ine}} Y_0) / [(Y_{\text{ine}} + Y_0)(Y_{\text{ino}} + Y_0)] \quad (3)$$

\$Y_0\$ 为传输线特性阻抗, \$Y_{\text{ino}}\$ (\$Y_{\text{ine}}\$) 为奇(偶)模输入导纳.利用式(3)可以计算输入输出间距离取不同值时传输零点的频率位置,计算表明随着输入输出间距离从 \$20^\circ\$ 增加到 \$90^\circ\$ 时,低频传输零点从 1.2GHz 增加到 1.76GHz,高频传输零点从 2.5GHz 增大到 2.96GHz;当输入输出间距离 \$90^\circ\$ 增加到 \$110^\circ\$ 时,低频传输零点从 1.76GHz 增加到 1.9GHz,高频传输零点从 2.96GHz 增大到 3.5GHz,可见随着输入输出间距离的增大,两个传输零点同时升高(降低),并且在输入输出间距离里大于 \$90^\circ\$

时,高频传输零点的变化趋势增大。

3 双环双模滤波器设计

本文设计的滤波器中心频率为 2.4GHz, 环形谐振器为全波长谐振器, 其长度为 $\lambda_c = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}}$, 介电常数选为 2.65, 则环形谐振器的长度为 84mm。谐振器的双模选为 2.25GHz 和 2.45GHz, 则由上述分析得到微扰小环的高度 $s = 1.17\text{mm}$, 长度 $p = 3.7\text{mm}$, 输入输出耦合间距为 21mm。传输线的阻抗选为 100Ω , 宽度为 0.7mm。输入输出耦合间距为 0.25mm。

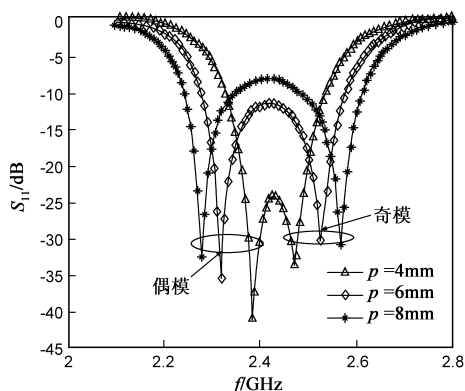


图4 p 取不同值时, 回波损耗的仿真结果

微扰小环具有两个可调参数, 高度 s 和长度 p 。现通过数值计算分别研究这两个参数对奇模谐振频率和偶模谐振频率的影响。用 IE3D 仿真图 1 中带输入输出耦合结构的双环双模滤波器。图 4 所示为微扰小环高度 s 为 1.7mm, 长度 p 分别取 4mm、6mm、8mm 时滤波器的回波损耗, 图中表明, 随着 p 逐渐增大, 偶模频率逐渐降低, 奇模频率逐渐升高。微扰小环长度 p 选定为 6mm, s 分别取 2mm、4mm、6mm 时仿真得到的回波损耗表明偶模频率分别为 2.23GHz、2.29GHz、2.36GHz, 奇模频率分别为 2.484GHz、2.495GHz、2.5GHz。因此 s 逐渐增大时, 偶模频率逐渐降低, 而奇模频率变化很小。

图 5 中, 输入输出耦合位置 d 影响两条传输路径,

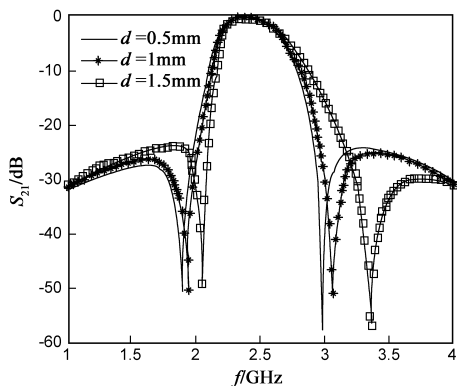
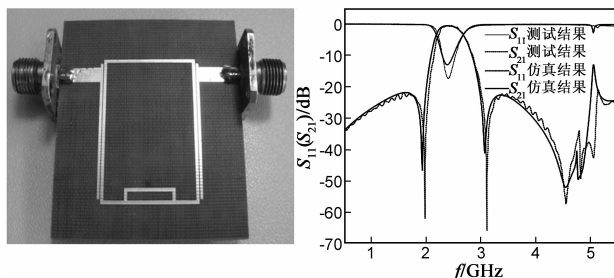


图5 d 取不同值时, 插入损耗的仿真结果

因此调节 d 来可以改变滤波器传输零点的位置。微扰小环的尺寸固定不变, 宽度 $s = 1.7\text{mm}$, 长度 $p = 7.5\text{mm}$, 图 5 所示为选取不同的 d 时, 滤波器的频响特性。图中指出, 随着 d 的增加(减小), 两个传输零点同时向上(下)偏移, 且滤波器的中心频率保持不变, 当 $d = 1.0\text{mm}$ 时, 传输零点关于频率 2.45GHz 对称。

4 仿真与测试结果

本文设计了中心频率为 2.4GHz 的双模双环滤波器, 利用 HFSS 软件仿真调节后得到滤波器的最终尺寸为 $W = 19.68\text{mm}$, $L = 24.5\text{mm}$, $Wg = 0.6\text{mm}$, $s = 1.7\text{mm}$, $p = 9.6\text{mm}$, $Lf = 23\text{mm}$, $Wf = 2.68\text{mm}$, $g = 0.2\text{mm}$, $d = 0.8\text{mm}$ 。加工实现的滤波器实物照片如图 6(a), 采用环氧树脂板(FR-4), 介电常数为 2.65, 衬底厚度为 1mm, 介质损耗为 0.0035, 导体厚度为 0.035mm。利用 Agilent8722ES 矢量网络分析仪进行测试。图 6(b)所示为双模双环滤波器的仿真和测试结果, 两者吻合良好。测试得到的中心频率为 2.41GHz, 3dB 相对带宽为 17.77%。仿真和测试的通带内插入损耗分别为 0.31dB 和 0.67dB; 反射(回波)损耗分别为 25dB 和 17dB; 带外衰减均大于 20dB。由于没有考虑导体损耗、加工误差和接头的影响, 上述的一些偏差是可以理解的。



(a) 双环双模带通滤波器

(b) 双模双环滤波器的仿真和测试结果
图6

5 结论

本文提出并实现了一种新型的双环双模带通滤波器, 其中微扰小环结构具有两个可调参数, 可以方便的调节双模, 实现小型化。利用奇偶模法和仿真软件研究了微扰小环对双模的影响以及输入输出位置对传输零点的影响, 研究表明微扰小环的长度和高度影响两个模式的耦合强度, 并且对双模频率位置有不同的影响。研究发现调节输入输出接头的位置可以改变双模滤波器的传输零点。本文设计的双环双模带通滤波器的插入损耗测量结果为 0.67dB, 相对带宽为 17.77%, 且仿真结果和实测结果吻合较好。

参考文献:

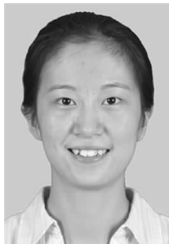
- [1] Wolff. Microstrip bandpass filter using degenerate modes of a microstrip ring resonator[J]. Electronic Letters, 1972, 8(12):

302 – 303.

- [2] J S Hong, M J Lancaster. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications[M]. New York: Wiley, 2001.
- [3] Michiaki Matsuo, Hiroyuki Yabuk, Mitsuo Makimoto. Dual-mode stepped-impedance ring resonator for bandpass filter applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology, 2001, 49(7): 1235 – 1240.
- [4] Adnan Görür, Ceyhun Karpuz, Mustafa Akpınar. A reduced-size dual-mode bandpass filter with capacitively loaded open-loop arms[J]. IEEE Microwave and Wireless Component letters, 2003, 13(9): 385 – 387.
- [5] Adnan Görür. Description of coupling between degenerate modes of a dual-mode microstrip loop resonator using a novel perturbation arrangement and its dual-mode bandpass filter applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology, 2004, 52(2): 671 – 677.
- [6] Y X Wang, B-Z Wang, J Wang. A compact square loop dual-mode bandpass filter with wide stop-band[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2007, 77: 67 – 73.
- [7] Si-Weng Fok, Pedro Cheong, Kam-Weng Tam, Rui P Martins. A novel microstrip square-loop dual-mode bandpass filter with simultaneous size reduction and spurious response suppression [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology, 2006, 54(5): 2033 – 2041.
- [8] Adnan Görür, Ceyhun Karpuz. Miniature dual-mode microstrip filters[J]. IEEE Microwave and Wireless Component Letters, 2007, 17(1): 37 – 39.
- [9] W Kang, W Hong, J Y Zhou. Performance improvement and size reduction of microstrip dual-mode bandpass filter[J]. Electronic Letters, 2008, 44(6): 421 – 422.

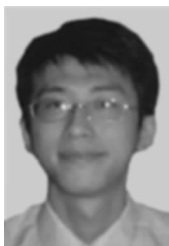
- [10] L-P Zhao, X Zhai, B Wu, T Su, W Xue, C -H Liang. Novel design of dual-mode bandpass filter using rectangle structure [J]. Progress in Electromagnetics Research B, 2008, (3): 131 – 141.

作者简介:



褚 瑞 女, 1985 年 5 月生于陕西西安. 硕士. 研究方向为滤波器.

E-mail: ruichu@sjtu.edu.cn



周 亮 男, 2005 年于英国约克大学获得博士学位, 2005 年至 2006 年在摩托罗拉公司担任高级射频工程师, 2006 年上海交通大学射频与微波技术研究中心讲师, 2007 年 8 月至 2008 年 1 月在麻省理工学院作访问. 目前主要从事射频、微波集成电路与器件的理论和应用研究, 包括射频与微波器件及电路的建模、设计、实验测量、参数提取和微纳米处理技术等.



毛军发 男, 1965 年 8 月出生, 1992 年在上海交通大学获博士学位, 然后留校工作至今. 国家 973 计划首席科学家, 国家杰出青年科学基金获得者, 教育部长江学者, 国家自然科学基金委创新研究群体学术带头人. 研究方向包括高速电路系统的互连问题、微波射频电路等, 在这些研究领域主持了 10 个国家级项目的研究, 共发表了 200 多篇学术论文, 于 2004 年获国家自然科学基金二等奖(第 2 完成人), 2008 年获国家技术发明二等奖(第 1 完成人).