

文章编号: 2096-1618(2020)03-0279-04

# 一种多槽线扰动的双模滤波器

陈薪隆, 史久成, 李宇寰, 莫梓续, 陈 龙, 程小军, 秦 然, 李荣强  
(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**提出一种新型的双模微带滤波器。通过利用一对交叉槽线、一个方形槽和一个方形切角来实现模式分离,并结合正交馈电方式,实现良好的双模滤波器特性。仿真的滤波器中心频率为1.63 GHz,1 dB带宽为180 MHz (1.54 ~ 1.72 GHz),并能在带外产生两个传输零点。对滤波器进行了加工测试,测试结果与仿真结果基本一致。该滤波器具有结构紧凑,插入损耗小,带外抑制性好等特点。

**关键词:**双模滤波器;微带滤波器;带通滤波器;传输零点;带外抑制

**中图分类号:**TN713

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2020.03.006

## 0 引言

现代通信系统要求滤波器具有小尺寸,低带内插入损耗和好的带外抑制<sup>[1-2]</sup>。由于仅用一个谐振器就能产生两个谐振模式,双模滤波器与单模滤波器相比越来越受到众多科研人员和工程师的青睐。当前,常见的滤波器类型有金属波导、基片集成波导和微带滤波器。由于具有高Q值和高功率容量,金属波导滤波器具有极好的性能,但是体积偏大,不易与微波平面电路进行集成。金属波导双模滤波器通常利用对谐振腔体切角或添加调谐螺钉来实现模式扰动。Guglielmi M等<sup>[3]</sup>提出一种不使用扰动元件的矩形金属波导双模滤波器,通过调整输入输出激励与腔体中心线的偏移来实现双模工作。通过调整相关参数的尺寸,该滤波器能在带外任一侧产生一个传输零点。基片集成波导滤波器的原理是通过平面介质基板实现波导滤波器的特性,它的性能介于金属波导和微带滤波器之间。李荣强等<sup>[4]</sup>利用倾斜的槽线实现模式扰动,提出了一款双模基片集成波导滤波器。

微带滤波器由于具有低侧面、低成本且易于批量生产而被广泛地应用和研究。设计双模微带滤波器的方法是通过扰动元件来产生两个简并模式,然后进一步调整两个模式的耦合来实现良好的滤波器性能。1972年,Wolff等<sup>[5]</sup>首次利用圆环贴片设计了一个双模微带滤波器。经过不断研究和发展,目前实现双模微带滤波器的谐振器已有多种形状,如工字型<sup>[6]</sup>,三角形<sup>[7-8]</sup>、环形贴片<sup>[9-11]</sup>等。雷涛等<sup>[6]</sup>采用奇偶模方法对工字型双模谐振器的特性进行分析,提出了一种

二阶带通滤波器。Hong J S等<sup>[7]</sup>首次提出一种槽线扰动的三角形片谐振器双模滤波器,并对电路模型进行了分析。Liu H W等<sup>[8]</sup>首次提出一种槽线扰动的三角形片谐振器双模滤波器,并对电路模型进行了分析,提出一种三角形片谐振器双模滤波器,该滤波器利用输入输出支线来实现简并模式。吴燕等<sup>[9]</sup>通过在方形环谐振器的一个或多个角上,利用方向贴片或方向切角作为扰动元件来实现简并模式,从而实现双模滤波器。张友俊等<sup>[10]</sup>设计了一种六边环内增加微扰小环的双模带通滤波器。Sung Y<sup>[11]</sup>设计了一种宽度逐渐递变的圆形开槽双模滤波器。利用双模谐振器的谐振特性,一些宽带滤波器<sup>[12-13]</sup>或双通带滤波器<sup>[14-15]</sup>被发展起来。由上述文献可知,双模滤波器的扰动通常采用切角、开槽或增加一个微扰片的方式来实现。在这几种方法中,开槽的位置和尺寸可以更灵活,它能更有效地调整两个简并模式之间的耦合。其次,开槽和切角更有利于实现滤波器的小型化。

提出了一种利用多槽线扰动的方向贴片谐振器双模滤波器,扰动元件包括交叉槽线、方形槽线和一个方形切角。设计的滤波器具有紧凑的结构,低的插入损耗,并能在通带附近产生两个传输零点,因而具有较好的带外抑制性。文中对提出的双模微带滤波器进行了理论分析和实验验证。

## 1 滤波器设计

提出的滤波器结构如图1所示。滤波器使用介电常数为2.65,厚度为1 mm的F4b-2基板设计。滤波器的谐振腔为一边长为 $L_p$ 的方形金属片,在贴片中心开有一对不等长的交叉型矩形槽,槽宽为 $W_s$ ,槽长分别

为  $L_{s1}, L_{s2}$ 。该交叉型矩形槽可用来扰动方型谐振腔,使其产生两个新的谐振模式。为了进一步优化双模滤波器的性能,在贴片中心再引入了一个边长为  $L_{s3}$  的矩形槽,并去掉一个边长为  $L_{s4}$  的方形切角。此外,该滤波器使用正交的输入输出馈线,长为  $L_{s5}$ ,宽为  $g_0$  的槽线用来调节50  $\Omega$ 输入输出微带线与方形谐振腔之间的匹配,它也能被用来微调滤波器的工作频率。利用高频电磁仿真软件 HFSS 进行仿真优化,最终得到的天线结构参数数值如下: $L_p = 41$  mm,  $L_s = 51$  mm,  $L_{s1} = 32$  mm,  $L_{s2} = 25$  mm,  $L_{s3} = 6$  mm,  $L_{s4} = 5$  mm,  $L_{s5} = 5.3$  mm,  $g_0 = 0.2$  mm,  $w_0 = 2.7$  mm,  $L_0 = 5$  mm。

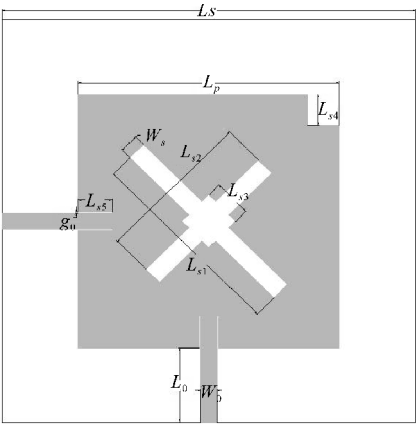


图 1 滤波器结构图

对上述双模微带滤波器进行仿真,可得到滤波器的频率响应,如图 2 所示。其中心频率为  $f_0 = 1.63$  GHz,1 dB带宽为1.54 ~ 1.72 GHz,带内最小插入损耗为0.3 dB,回波损耗大于19 dB。由于在带外1.3 GHz和1.9 GHz处具有两个传输零点,带外抑制分别达到52.25 dB和45.77 dB,因而滤波器具有较好的带外抑制性。

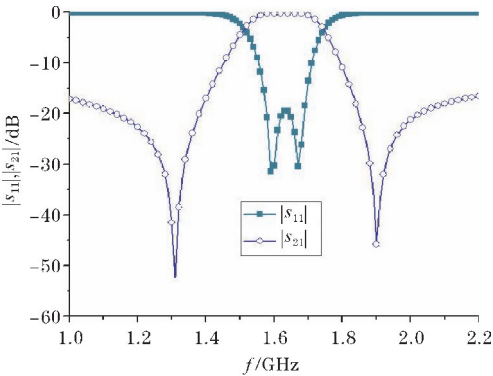


图 2 仿真的滤波器频率响应

2 滤波器参数分析

为了进一步阐明滤波器的性能,对滤波器的一些

重要参数进行了仿真分析。当一个参数被研究时,其他参数均保持不变。根据双模滤波器的理论推测,交叉槽、方形槽和切角作为双模滤波器的重要扰动元件,它们的尺寸 ( $L_{s1}, L_{s2}$  和  $W_s$ ) 对滤波器的性能将有重要影响。

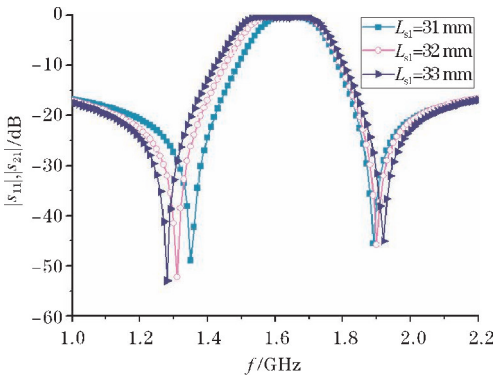


图 3 交叉槽长度  $L_{s1}$  对滤波器频率响应的影响

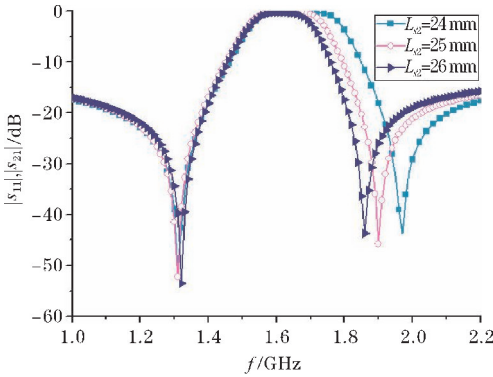


图 4 交叉槽长度  $L_{s2}$  对滤波器频率响应的影响

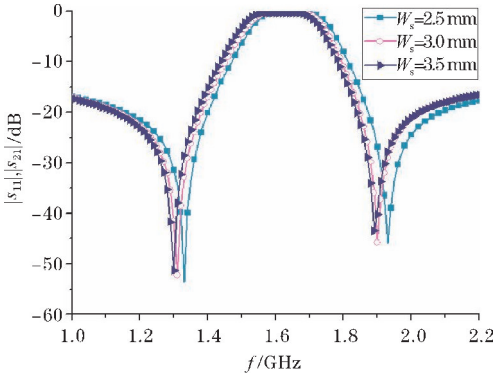


图 5 交叉槽宽度  $W_s$  对滤波器频率响应的影响

图 3 和图 4 分别给出了交叉槽线长度  $L_{s1}$  和  $L_{s2}$  的变化对滤波器频率响应的影响。由图可见,当槽线的长度  $L_{s1}$  和  $L_{s2}$  增加时,滤波器的带宽都将变宽。 $L_{s1}$  的增加将使传输零点更多地向低频带扩展,滤波器的中心频率下移;而  $L_{s2}$  的增加则使传输零点更多地向高频带扩展,使滤波器的中心频率上移。图 5 给出了交叉槽线宽度  $W_s$  对滤波器性能的影响。随着宽度的增加,滤波器的带宽基本不变,但中心频率下移。此外,

与交叉槽同中心的方形槽长度  $L_{s3}$  对滤波器的影响与  $L_{s2}$  类似,如图 6 所示。

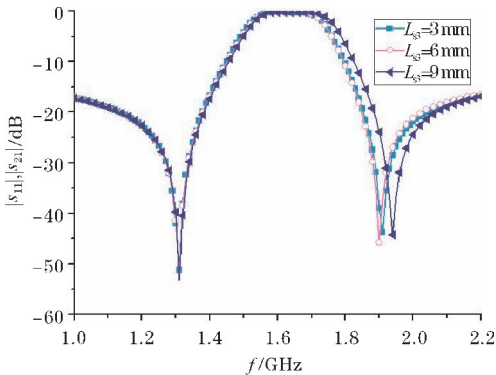


图 6 方形槽长度  $L_{s3}$  对滤波器频率响应的影响

滤波器的切角尺寸对滤波器的性能影响如图 7 所示。当  $L_{s4}$  从 4 mm 增大到 6 mm,滤波器的中心频率向高频方向移动,左右两边的传输零点也同时向高频移动,而滤波器的带宽基本保持不变。输入输出槽线长度  $L_{s5}$  对滤波器性能的影响与  $L_{s4}$  类似,如图 8 所示。仿真发现输入输出槽线的宽度对滤波器的中心频率影响较小,为了论文的简洁,此处没给出相应曲线。

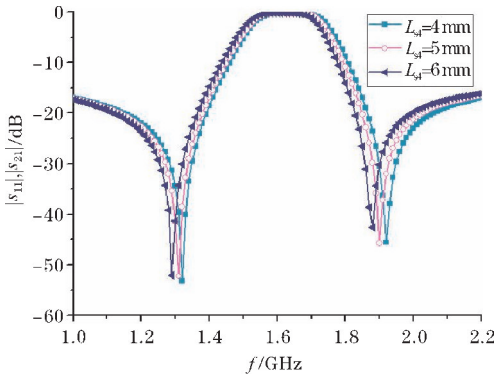


图 7 方形切角边长  $L_{s4}$  对滤波器频率响应的影响

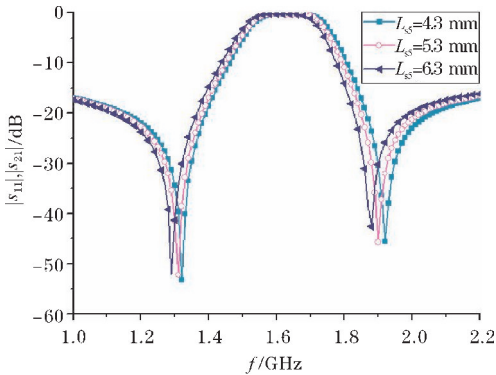


图 8 馈线槽长  $L_{s5}$  对滤波器频率响应的影响

由上述参数的分析可知,在滤波器的设计过程中,滤波器的带宽可以通过交叉槽的长度  $L_{s1}$ 、 $L_{s2}$  和  $L_{s3}$  来调节,中心频率可以通过  $L_{s4}$ 、 $L_{s5}$  来进行微调,而滤波器的传输零点可以通过以上参数进行组合调节。根据滤

波器理论,大幅度的中心频率则可以通过改变谐振腔尺寸  $L_p$  来进行调节。

3 滤波器实物测试与分析

对设计的滤波器进行了实物加工和测试,图 9 给出了滤波器的实物照片。利用矢量网络分析仪对滤波器的  $|S_{11}|$  和  $|S_{21}|$  进行了测量,测试装置如图 10 所示。图 11 是滤波器的测试曲线图。可以看出,实际测量通带中心频率为 1.67 GHz,带内回波损耗大于 14.5 dB,带内插入损耗为小于 1.0 dB,带外具有两个明显的传输零点。与图 2 的仿真曲线比较,测试与仿真结果基本一致,但测量的中心频率比仿真设计的中心频率上移了约 40 MHz。出现这种偏差的原因可能是由加工制造误差和 SMA 连接器焊接粗糙所引起的。

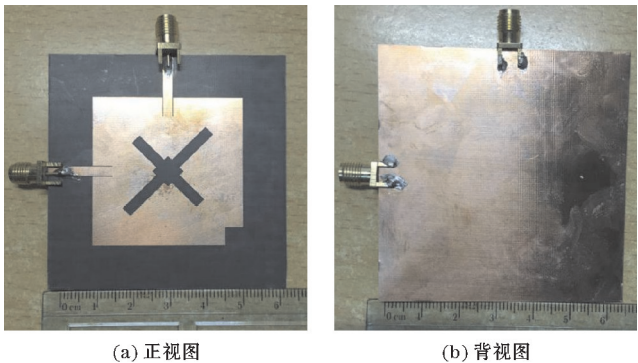


图 9 滤波器实物

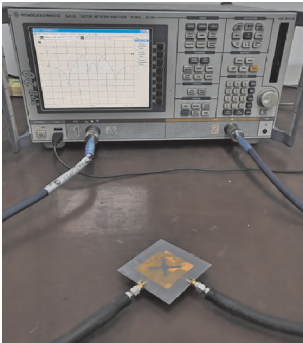


图 10 滤波器测试装置

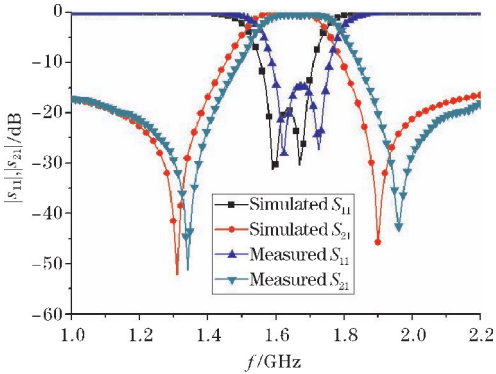


图 11 测试的滤波器频率响应



## 4 结束语

设计了一种利用多槽线扰动的新型双模微带滤波器。通过对多槽线和切角的组合调节,实现了良好的双模滤波器性能。分析了滤波器的重要参数对其性能的影响,并对滤波器进行了加工测试,测试结果与仿真结果基本一致。提出的滤波器具有较低的插入损耗,且能在带外两边产生两个可控的传输零点,因而具有良好的带外抑制性。该滤波器结构紧凑、成本低,适用于微波平面集成电路中。

致谢:感谢成都市科技项目(2019-YFYF-00152-SN);成都信息工程大学创新创业项目(201910621131)对本文的资助

## 参考文献:

- [1] 甘本被,吴万春. 现代微波滤波器的结构与设计[M]. 北京:科技出版社,1973.
- [2] Cameron R J, Kudsia C M, Mansour R R. Microwave filters for communication systems-fundamentals design and applications[M]. New York: Wiley, 2006.
- [3] Guglielmi M, Jarry P, Kerherve E, et al. A new family of all-inductive dual-mode filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(10): 1764-1769.
- [4] 李荣强,肖绍球. 一种槽线扰动的基片集成波导双模滤波器[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(11): 2791-2795.
- [5] Wolff I. Microstrip bandpass filter using degenerate modes of a microstrip ring resonator[J]. Electronics Letters, 1972, 8(12): 302-303.
- [6] 雷涛,张铎,向天宇,等. 基于工字型双模谐振器的双阶带通滤波器设计[J]. 电子元件与材料, 2018, 37(11): 67-70.
- [7] Hong J S, Li S. Theory and experiment of dual-mode microstrip triangular patch resonators and filters[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2004, 52(4): 1237-1243.
- [8] Liu H W, Cheng Z Q, Sun L L. Dual-mode triangular-patch bandpass filter using spur-lines[J]. Electronics Letters, 2006, 42(13): 302-303.
- [9] 吴燕,邓开乐,王代强. 方形环贴片双模微带带通滤波器的设计[J]. 电子技术应用, 2017, 43(12): 96-99.
- [10] 张友俊,曹雨露,马健. 六边环双模微带带通滤波器[J]. 电子元件与材料, 2014, 33(1): 35-38.
- [11] Sung Y. Dual-mode filter using ring resonator with non-uniform linewidth[J]. Electronics Letters, 2018, 34(1): 1076-1078.
- [12] Feng W J, Che W Q, Xue Q. Balanced filters with wideband common mode suppression using dual-mode ring resonators[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2015, 62(6): 1499-1507.
- [13] Feng W J, Zhang Y, Che W Q. Wideband filtering crossover using dual-mode ring resonator[J]. Electronics Letters, 2016, 52(7): 541-542.
- [14] 蔡伟伟,梁飞,吕文中,等. 基于双模谐振器的双通带可调谐滤波器设计[J]. 微波学报, 2018, 34(1): 65-69.
- [15] 王树兴,吴瑛,周东方,等. 基于微带贴片谐振器的高选择性双模双通带带通滤波器的研究[J]. 电子学报, 2018, 46(3): 596-601.

## A Dual-mode Filter with Multi-slot Line Perturbation

CHEN Xinlong, SHI Jiucheng, LI Yuhuan, MO Zixu, CHEN Long, CHENG Xiaojun, QIN Ran, LI Rongqiang  
(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** A novel dual-mode microstrip filter is proposed in this paper. By using a pair of unequal crossed slots, a square slot and a square cut, the mode separation is achieved. When combined with orthogonal feed mode, good dual-mode filter characteristics can be achieved. The simulated central frequency of the filter is 1.63 GHz, the bandwidth of 1 dB is 180 MHz (1.54-1.72 GHz), and two transmission zeros (TZ) can be generated out of passband. The filter is fabricated and measured, and the measured results are basically consistent with the simulation results. The filter has the advantages of compact structure, low insertion loss and good out-of-band suppression.

**Keywords:** dual mode filter; microstrip filter; bandpass filter; transmission zeros; out-of-band suppression