

文章编号: 2095-4980(2018)04-0668-04

## X波段阶梯阻抗微带带通滤波器设计

张威<sup>1</sup>, 叶龙芳<sup>\*1,3</sup>, 许雄<sup>2</sup>, 张勇<sup>3</sup>, 徐锐敏<sup>3</sup>

(1.厦门大学 电磁声学研究院, 福建 厦门 361005; 2.电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003;  
3.电子科技大学 极高频复杂系统国防重点学科实验室, 四川 成都 611731)

**摘要:**设计了一款X波段的多模带通滤波器,并给出了仿真与实验结果。采用恒定阻抗枝节加载3个阶梯阻抗枝节的方式,构成滤波器的主体;利用表面电流分布图获得影响带内极点分布的枝节参数,通过调整阶梯阻抗枝节参数优化滤波性能。为实现更好的带外抑制能力,滤波器两端各串联一对平行耦合线,在14 GHz引入一个传输零点。实验测试结果显示,所设计滤波器的中心频率为9.76 GHz,带宽为2.4 GHz,30 dB/3 dB矩形系数为1.63,相对带宽为25%,带内插入损耗大部分小于1 dB,大部分回波损耗高于15 dB,与仿真结果较为吻合。

**关键词:**多模滤波器;阶梯阻抗;带外抑制;奇偶模;传输零点

中图分类号: TN713<sup>+5</sup>

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201804.0668

## Design of multi-mode microstrip bandpass filter using stepped impedance resonator at X-band

ZHANG Wei<sup>1</sup>, YE Longfang<sup>\*1,3</sup>, XU Xiong<sup>2</sup>, ZHANG Yong<sup>3</sup>, XU Ruimin<sup>3</sup>

(1. Institute of Electromagnetics and Acoustics, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China; 2. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang Henan 471003, China; 3. EHF Key Laboratory of Fundamental Science, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

**Abstract:** A multimode bandpass filter working at X-band is designed and developed, and both the simulated and measured results are presented. A constant-impedance stub loaded with three stepped-impedance stubs constitutes the main structure of this filter. Surface current distribution maps are utilized to acquire parameters which influence the distribution of transmission poles. By regulating the parameters of stepped impedance stubs, the performance of this filter can be optimized. For further enhancing the suppression of stop band, a pair of parallel coupled lines are joined up in series at both sides to introduce a transmission zero at 14 GHz. The measured results show that the designed filter has the center frequency of 9.76 GHz, the bandwidth of 2.4 GHz, the rectangular coefficient at 30 dB/3 dB of 1.63, the relative bandwidth of 25%, and most of the insertion loss and the return loss of the passband are respectively less than 1 dB and higher than 15 dB, which agree well with the simulated results.

**Keywords:** multi-mode filters; stepped-impedance; suppression of stop band; odd/even mode; transmission zero

X波段一般指频率在8~12 GHz的微波波段,主要用于空间研究、广播卫星、固定通信业务卫星、地球探测卫星、气象卫星等。微波滤波器用来分离不同频率的微波信号,使得有用信号能够低损耗通过,无用的干扰信号能被很好抑制。它是微波射频前端系统的核心组件,也是最重要的无源微波器件。通过设计与使用合适的微波滤波器,可以有效解决不同制式通信系统之间的干扰问题。

近年来,人们研究了多种结构形式的X波段带通滤波器,如基于发夹形谐振器<sup>[1]</sup>、方形开环谐振器<sup>[2]</sup>、阶梯阻抗谐振器(Stepped Impedance Resonator, SIR)<sup>[3]</sup>等形式的微带带通滤波器、基片集成波导滤波器<sup>[4-5]</sup>、腔体滤波

收稿日期: 2017-06-05; 修回日期: 2017-07-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61601393); 福建省自然科学基金资助项目(2016J01321); 极高频复杂系统国防重点学科实验室开发基金资助项目

\*通信作者: 叶龙芳 email:lfye@xmu.edu.cn

器<sup>[6-7]</sup>、低温共烧陶瓷滤波器<sup>[8]</sup>等。其中, 阶梯阻抗谐振器是指由 2 个以上具有不同特征阻抗的传输线组合而成的横向电磁场或准横向电磁场模式的谐振器。通过引入阻抗阶梯跳变, 可以在减小电路尺寸的同时, 把滤波器的寄生通带向频率高端推移。相比于传统的均匀阻抗谐振器, SIR 尺寸小, 易于集成, 由于存在宽度不等的多条传输线, 故而设计自由度更高。另外, SIR 与已知的平行耦合线、发夹形、交指形等结构相结合, 又能设计出满足不同性能要求的滤波器。

基于此, 本文采用阶梯阻抗谐振器结构设计了一款 X 波段的四模微带带通滤波器, 尺寸小, 易于加工, 且由于带内存在 4 个极点, 带内较为平坦, 同时有着较为优越的矩形系数。

### 1 滤波器结构设计与分析

#### 1.1 滤波器结构

本文设计的多模滤波器由一个多模阶梯阻抗谐振器两端各对称串联一对平行耦合线组成, 如图 1 所示。其中多模阶梯阻抗谐振器由一个恒定阻抗的线谐振器上对称地加载 3 个阶梯阻抗的开路微带枝节所组成, 其中上方 2 个为两端对称加载, 高阻抗微带线的长宽分别为  $l_4, w_4$ , 低阻抗微带线的长宽为  $l_3, w_3$ ; 下方则是中心加载的方式, 高阻抗微带线对应长宽为  $l_2, w_2$ , 低阻抗微带线的长宽为  $l_1, w_1$ 。平行耦合线的长度为  $pl_2$ , 决定插入传输零点的频率大小。滤波器的基板采用 Rogers 5880, 厚度为 0.787 mm, 相对介电常数为 2.2, 损耗角正切为 0.000 9, 整个滤波器的尺寸为 40 mm×9 mm。

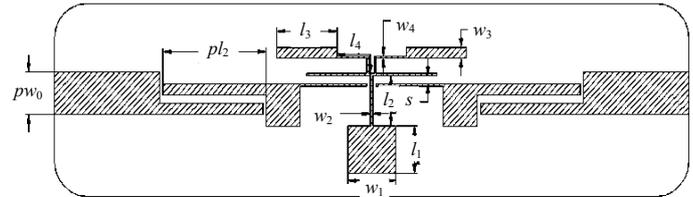


Fig.1 Model of proposed filter  
图 1 滤波器模型

#### 1.2 多模阶梯阻抗谐振器分析

设枝节长度参数  $l_i$  对应的电长度为  $\theta_i$ ; 枝节宽度参数  $w_i$  对应的特性阻抗为  $Z_i$ 。则 2 种阶梯阻抗枝节的谐振条件为<sup>[9]</sup>:

$$\tan \theta_1 \tan \theta_2 = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (1)$$

$$\tan \theta_3 \tan \theta_4 = \frac{Z_4}{Z_3} \quad (2)$$

通过该公式, 可以得到所需阶梯阻抗谐振器的特性阻抗与电长度, 进而可算出对应枝节的宽度与长度初值。图 2 为多模谐振器在弱耦合下的仿真结果, 可以看到, 在通带范围内存在 4 个传输极点  $P_1, P_2, P_3$  和  $P_4$ , 其频率分别为  $f_{P1}, f_{P2}, f_{P3}$  和  $f_{P4}$ , 显然, 极点  $P_1$  和  $P_4$  决定了滤波器的通带范围, 而  $P_2$  和  $P_3$  将影响着带内插入损耗的波纹。

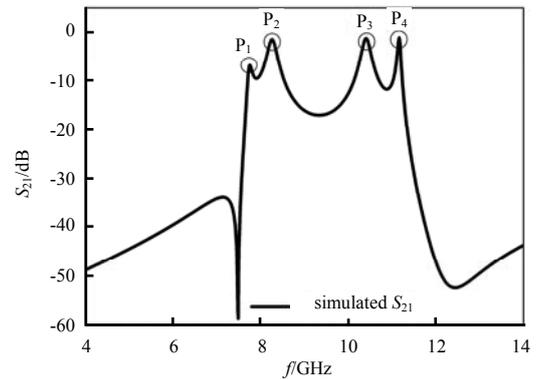


Fig.2 Simulated insert loss under weak coupling  
图 2 弱耦合下的插入损耗

图 3 为极点频率  $f_{P1}=7.74$  GHz 和  $f_{P4}$  处的滤波器的归一化表面电流分布图, 通过面电流分布可以找到对极点产生主要影响的枝节参数。如图 3(a)所示, 在 7.74 GHz 下, 滤波器表面电流呈对称分布在两端加载和中心加载的阶梯阻抗枝节上; 如图 3(b)所示, 在 11.16 GHz 下, 表面电流则呈对称分布在两端加载的枝节上, 而在中心加载的枝节上几乎没有电流分布。可知, 极点  $P_1$  为偶模谐振频率, 2 种加载的阶梯阻抗枝节参数都会对其产生影响, 而  $P_4$  则是奇模谐振频率, 只有两端对称加载的阶梯阻抗枝节参数对其产生较大影响。滤波器的传输极点频率随结构尺寸的变化关系如图 4 所示, 传输极点  $P_1$  处的频率主要由  $l_1$  控制, 随着  $l_1$  的增大而减小, 并对  $P_4$  处的频率几乎没有影响; 而  $P_4$  处的频率主要由  $l_3$  控制, 随  $l_3$  的增大而减小, 同时对  $P_1$  处的频率也有影响, 但影响不剧烈。通过上述分析, 可以通过改变  $l_1, l_3$  的值来获得较大的微波频段带宽调节范围, 从而设计出满足频带要求的滤波器。



Fig.3 Normalized surface current distribution  
图 3 归一化表面电流分布图

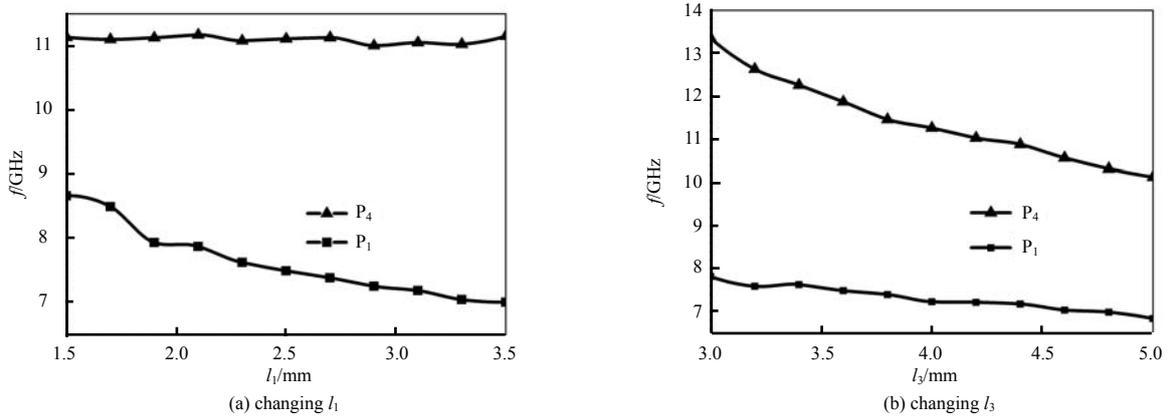


Fig.4 Frequencies of transmission poles varied with the size of the structure

图 4 传输极点频率随结构尺寸的变化

### 1.3 平行耦合线

对未引入两边的平行耦合线的初始滤波器模型进行仿真,其结果如图 5 所示,仿真分析通带附近的阻带无法有效抑制,且两边的带阻性能矛盾,难以同时满足,如果一边的阻带满足要求,另一边的阻带的  $S_{21}$  就会升高。为解决这个问题,在滤波器左右两端各接入一对平行耦合线。在保证低频阻带满足要求的情况下,通过平行耦合线在 14 GHz 附近引入一个传输零点,从而实现阻带的抑制效果。

## 2 结果与分析

本文设计的滤波器两端采用  $50 \Omega$  的 SMA 接头,为实现良好的阻抗匹配,其馈线端口阻抗设计为  $50 \Omega$ ,对应的馈线宽度  $pw_0=2.4 \text{ mm}$ ,利用 HFSS 软件优化后的滤波器结构参数如下:  $l_1=2.7 \text{ mm}, w_1=2.5 \text{ mm}; l_2=1.45 \text{ mm}, w_2=0.15 \text{ mm}; l_3=3.8 \text{ mm}, w_3=0.6 \text{ mm}, s=0.24 \text{ mm}, pl_2=6.5 \text{ mm}$ 。为更准确地模拟所设计滤波器,这里采用考虑到焊点影响的滤波器仿真模型进行仿真,如图 6(a)所示,即在滤波器模型的两端馈线上设置两段锡材料的半圆柱线(见灰色部分),对应的滤波器实物图如图 6(b)所示。图 6(c)为仿真与实测  $S$  参数对比图:实测得到 3 dB 通带范围为 8.56~10.96 GHz, 30 dB/3 dB 的矩形系数为 1.63,与仿真结果吻合较好。在仿真得到的  $S_{11}$  曲线上可以观测到其极点分布较为均匀,这使得通带范围内的  $S_{21}$  波纹较小,但由于加工误差以及其他实验因素的影响,造成实测在 10.5 GHz 处有较大的反射,进而造成该频率点附近的插损略大于 1 dB。另外,与图 5 结果对比可见,由于引入了平行耦合线,所设计的滤波器在 14 GHz 处的跳变点得到了有效抑制。使用阶梯阻抗枝节加载型的多模滤波器,可以获得较小的尺寸,同时具有更高的设计自由度,因此,在高性能微波器的设计中将越来越重要。

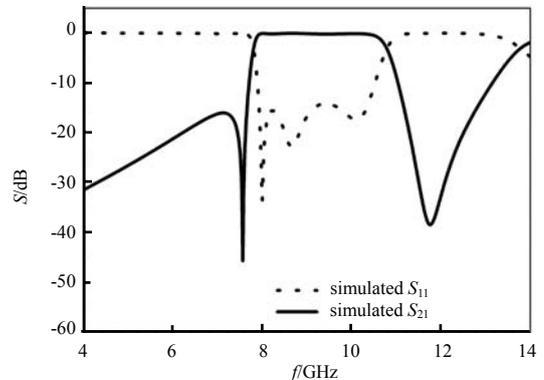
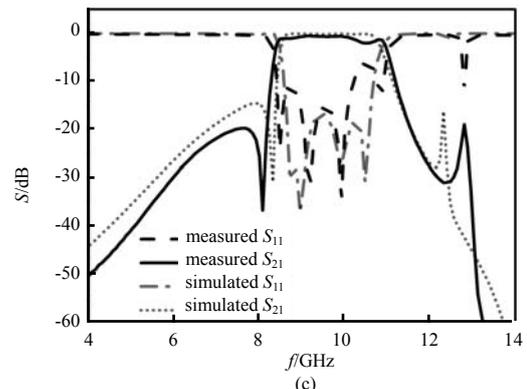
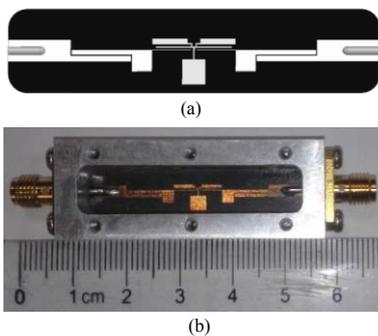


Fig.5 Simulated results without introducing parallel coupled lines

图 5 未引入平行耦合线滤波器的仿真结果

Fig.6 (a) Simulated filter model with traces;(b) the physical photo of filter and (c) the  $S$  parameters of both simulated and measured results图 6 (a) 带有焊点的滤波器仿真模型; (b) 滤波器实物图; (c) 仿真与实测结果  $S$  参数

### 3 结论

本文设计仿真并实测了一款阶梯阻抗枝节加载型的多模滤波器,通过串联平行耦合线,优化枝节参数,最终得到滤波器的中心频率为 9.76 GHz,带宽为 2.4 GHz,相对带宽为 25%,带内插入损耗大部分小于 1 dB,通过引入的平行耦合线使得所设计的滤波器具有较好的带外抑制能力。

#### 参考文献:

- [ 1 ] YE J,QU D,ZHONG X,et al. Design of X-band bandpass filter using hairpin resonators and tapped feeding line[C]// 2014 IEEE Symposium on Computer Applications and Communications(SCAC). Weihai,China:IEEE, 2014:93-95.
- [ 2 ] FATHNAN A A,AMRULLAH Y S,WIJAYANTO Y N,et al. A compact X-band bandpass filter using rectangular split ring resonators for radar applications[C]// International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications. Bandung, Indonesia:IEEE, 2015:60-63.
- [ 3 ] 郭婧,汪常娥. X波段交叉耦合型 SIR 带通滤波器的设计[J]. 微波学报, 2014(S1):161-164. (GUO Jing,WANG Chang'e. Design of X-band cross-coupled stepped impedance resonator band-pass microstrip filter[J]. Journal of Microwaves, 2014(S1):161-164.)
- [ 4 ] HUANG T,YANG X,HUANG Y,et al. An X-band SIW-DGS bandpass filter with improved stopband performance[C]// IEEE International Conference on Communication Problem-Solving. Guilin,China:IEEE, 2015:473-474.
- [ 5 ] JIN C,CHEN J X,CHU H,et al. X-band differential bandpass filter with high common-mode suppression using substrate integrated waveguide cavity[J]. Electronics Letters, 2014,50(2):88-89.
- [ 6 ] GUO C,SHANG X,LI J,et al. A lightweight 3D printed X-band bandpass filter based on spherical dual-mode resonators[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2016,26(8):568-570.
- [ 7 ] CAI F,KHAN W T,PAPAPOLYEROU J. A low loss X-band filter using 3D polyjet technology[C]// 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Phoenix,AZ,USA:IEEE, 2015:1-4.
- [ 8 ] 惠力,唐高弟,李中云. LTCC宽边耦合交指型超宽带滤波器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(5):582-585. (HUI Li,TANG Gaodi,LI Zhongyun. Design of an ultra-wideband LTCC filter based on broadside-coupled interdigital structure[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(5):582-585.)
- [ 9 ] 胡金萍,李国辉,景冻冻,等. 基于阶跃阻抗谐振器的新型双频宽带带通滤波器[J]. 上海大学学报, 2012,18(3):231-234. (HU Jinping,LI Guohui,JING Dongdong,et al. Wide bandwidth dual-band bandpass filter based on step impedance resonator[J]. Journal of Shanghai University, 2012,18(3):231-234.)

#### 作者简介:



张 威(1993-),男,安徽省阜阳市人,在读硕士研究生,主要研究方向为微波器件、太赫兹波导技术。

张 勇(1975-),男,四川省南充市人,教授,主要研究领域为微波毫米波集成电路和固态太赫兹技术等。

叶龙芳(1983-),男,福建省莆田市人,助理教授,主要研究方向为微波毫米波电路与天线、太赫兹技术、石墨烯与表面等离子体光子学。

许 雄(1985-),男,福建省莆田市人,博士,助理研究员,主要研究方向为复杂电磁环境特性与模拟、雷达导引头、雷达对抗试验技术等。

徐锐敏(1958-),男,四川省乐山市人,教授,主要研究领域为微波一毫米波电路与系统、非线性微波毫米波固态电路与系统。