

基于多段 SIR 的微带交指滤波器小型化设计*

韩昌霖 吴建飞 郑亦菲 陈乐东 丁浩
(国防科技大学电子科学学院 长沙 410000)

摘要: 微带交指滤波器作为一种常见的二维滤波器,在工程上有着广泛应用,但由于其尺寸较大,从而限制了应用场景的扩展。基于阶跃阻抗谐振器(stepped impedance resonator, SIR)理论,设计了一款新型微带交指滤波器,完成了对传统微带交指滤波器的尺寸优化。该滤波器使用三段式 SIR 结构,与传统结构滤波器的谐振器相比,长度缩减了 23.2%。利用 CST 仿真了相同设计指标下 SIR 滤波器和传统滤波器的性能,结果表明二者都能够满足设计指标要求,且 SIR 滤波器在通带内性能更佳,说明使用该方法实现小型化具有较强实用意义。为验证滤波器的可用性,进行了实物加工和测试,谐振结构尺寸为 10.9 mm×13.6 mm,为便于测试,电路板尺寸为 24 mm×18 mm×0.508 mm,实测结果与仿真结果在通带内最大差异小于 1.5 dB。该滤波器的最终指标为中心频率 2.5 GHz,带宽 150 MHz,带内损耗≤4 dB,阻带抑制≥23 dB(频率≤2.2 GHz 或≥2.72 GHz)。

关键词: 多段 SIR;微带线;带通滤波器;交指结构;小型化

中图分类号: TN713+.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Miniaturized design of microstrip cross-finger filters based on multiband SIR

Han Changlin Wu Jianfei Zheng Yifei Chen Ledong Ding Hao

(College of electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410000, China)

Abstract: Microstrip cross-finger filters, as a common two-dimensional filter, have a wide range of engineering applications, but due to their large size, thus limiting the expansion of application scenarios. In this paper, a new microstrip cross-finger filter is designed based on the theory of step impedance resonator (SIR), which completes the optimization of the size of the conventional microstrip cross-finger filter. The filter uses a three-section SIR structure, which reduces the length by 23.2% compared to the resonator of a conventionally structured filter. The performance of SIR filter and traditional filter under the same design index is simulated using CST, and the results show that both of them can meet the design index requirements, and the performance of SIR filter is better in the passband, which indicates that the use of this method to realize the miniaturization has strong practical significance. In order to verify the usability of the filter, physical processing and testing were carried out with a board size of 24 mm×18 mm×0.508 mm, and resonant structure size of 10.9 mm×13.6 mm, the measured results and the simulation results show that the difference between the measured and simulated results is less than 1.5 dB at the passband. The final specifications of this filter are center frequency 2.5 GHz, bandwidth 150 MHz, in-band loss ≤4 dB, and stopband rejection ≥24 dB (frequency ≤2.2 GHz or ≥2.72 GHz).

Keywords: multiband SIR; microstrip line; bandpass filter; cross-finger structure; miniaturization

0 引言

随着无线通信技术的高速发展,越来越多的电子设备

具备了收发电磁信号的能力,同时也产生了更多的谐波和杂散电磁辐射,而这些辐射往往会影响其他电子设备的工作性能。因此,各种电子设备都有抑制谐波、杂散等非期

收稿日期:2024-02-20

* 基金项目:国家自然科学基金青年基金(62104255)、国防科技大学校科研项目(ZK21-21)资助

望辐射的需求,以减小干扰、选择出所需要的电磁信号。而滤波器作为实现这一目的的关键射频器件,其作用越发重要,对性能的要求也越发提升,在过程中的应用也越发广泛^[1-4]。同时,电子设备的小型化、轻量化、便携化趋势也要求滤波器的体积要尽可能小,便于与其他系统集成。

目前,常用的滤波器设计方法包括奇偶模法、半经验法、插入损耗法及利用仿真软件辅助设计等方法^[5-8]。在此基础上,出现了许多滤波器小型化的方案,主要可以分为两类。一类是将滤波器在三维空间上进行设计。文献[9]设计了一款高低缺陷地结构滤波器,在地平面上开两个矩形槽,开槽内再放置一根矩形阻抗条,从而构成了两个不同频率的谐振器,实现了阶数扩展,变相完成了小型化。文献[10]设计了一款三层结构的滤波器,其输入端和输出端分别为微带线并联枝节结构,中间层为地平面上开槽结构,该滤波器使用了微带-微带垂直跃迁技术,使其具有共模抑制能力。文献[11]设计了一款左右手传输线滤波器,该滤波器在微带线顶层设计两个左手级结构,在底层设计一个右手级结构,从而减小了整体的尺寸。另一类是对平面滤波器的结构进行优化。文献[12]设计了四阶和六阶S波段带通滤波器,该滤波器采用开口方环结构,通过改变方环的排列方式实现了小型化。文献[13]提出了一款小体积的四模谐振器,两个双模谐振器组成,双模谐振器中间引入耦合线作为输入输出端口,所有的谐振器仅使用了一个通孔。文献[14]通过将平行耦合线滤波器和发夹型滤波器相结合的方式,改善了平行耦合线结构横向长度过大的问题。文献[15]针对并联短截线滤波器长度较大的问题,提出终端弯折和整体拆分的方案减小了短截线长度。

利用阶跃阻抗谐振器(steped impedance resonator, SIR)也是一种常用的小型化方式。文献[16]利用SIR结构改进了发夹型滤波器,文献[17]改进了平行耦合滤波器,但这两款滤波器整体结构相对复杂,设计难度大。文献[18]在交指滤波器中引入了SIR结构,减小了整体面积和谐振器长度,并通过添加发夹型结构,改善了滤波器的抑制特性,文献[19]利用薄膜工艺并基于SIR结构设计了一款双通带滤波器,还增加了阻抗补偿以优化响应特性,但这两款滤波器都属于宽带滤波器,没有针对窄带设备的应用场景。

本文通过将传统交指滤波器中的谐振器替换为多阶SIR的方式,设计了一款工作在S波段的窄带带通滤波器,其相对带宽为6%。通过分析耦合系数,表明了多阶SIR滤波器能够压缩谐振器间距减小宽度扩展。利用CST对滤波器进行了仿真和尺寸优化,并与相同性能的传统交指滤波器作了对比。仿真结果表明,多阶SIR交指滤波器比传统交指滤波器的性能更佳,且能将长度缩减23.2%。为了验证该方案的可行性,进行了实物加工和测

试,其结果与仿真差异较小,说明该方法能够用于滤波器的小型化设计。

1 SIR理论分析与谐振器设计

常见的微带交指滤波器结构如图1所示。该结构使用微带线依次排列作为谐振器,在每个谐振器上打孔接地,相邻谐振器间的接地孔方向相反,输入输出端接一段微带线作为馈电结构。谐振器的谐振频率由谐振器的长度和宽度确定,一般谐振器长度近似为 $\lambda/4$ 。

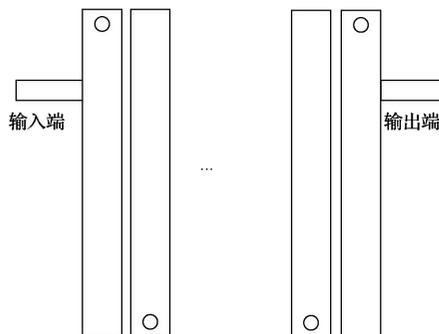


图1 常见的微带交指滤波器结构

Fig. 1 Common microstrip cross-finger filter structure

设计滤波器之前,需要确定中心频率,带宽,阶数,阻带抑制等参数,方便指导谐振器尺寸设计。一般可通过归一化原型低通滤波器找到每一阶所对应的元件值,再利用耦合系数计算公式计算出每一阶谐振器的耦合系数,计算公式如下:

$$K_{ij} = \frac{B_w/f}{\sqrt{g_i g_j}} \quad (1)$$

式中: K_{ij} 为谐振器耦合系数; B_w 为滤波器带宽; f 为中心频率; g_i 和 g_j 为对应阶数滤波器原型元件值, g_i 和 g_j 可参考滤波器设计手册中给出的结果。

得到耦合系数后,可根据耦合系数确定各阶谐振器的距离。该步骤可利用仿真软件完成,具体步骤如下:1)建立一个双谐振器模型,并进行本征模仿真;2)改变两谐振器之间的距离,得到不同模型下对应的谐振频率;3)利用最低的两个谐振频率计算耦合系数并与式(1)的结果进行对比,耦合系数相等时所对应的距离即为对应阶数谐振器间的距离。该步骤中耦合系数计算公式如下:

$$K_{ij} = \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 + f_1^2} \quad (2)$$

式中: K_{ij} 为谐振器耦合系数; f_2 为第2谐振频率; f_1 为第1谐振频率。SIR是两级或两级以上不同宽度、不同阻抗传输线组合形成的一种结构,常见的包括全波长、半波长、1/4波长型等,而1/4波长型SIR与微带交指滤波器较为相似,二阶1/4波长型SIR的结构如图2所示。相比微带交指滤波器的谐振器而言,SIR有更大的设计自由度,同时由于其阻抗的不一致性,可以缩减谐振器的长度。

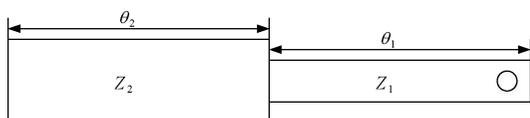


图2 二阶1/4波长型SIR结构
Fig. 2 Second-order 1/4 λ SIR structure

该结构的输入阻抗如下:

$$Z = jZ_2 \frac{Z_1 \tan \theta_1 + Z_2 \tan \theta_2}{Z_2 - Z_1 \tan \theta_1 \tan \theta_2} \quad (3)$$

式中: Z 为输入阻抗; Z_1 为窄段阻抗; Z_2 为宽段阻抗; θ_1 为窄段电长度所对应的角度; θ_2 为宽段电长度所对应的角度。

当输入阻抗 Z 为无穷大时, 满足谐振条件, 此时式(4)成立。

$$Z_2 - Z_1 \tan \theta_1 \tan \theta_2 = 0 \quad (4)$$

由式(4)可以看出, SIR 的谐振频率与每一级的长度和宽度都相关, 因此所有的尺寸参数都能进行调整以达到设计的谐振频率。

基于上述理论, 本文设计了一种三段式 SIR 结构, 如图3所示。采用三段式 SIR 结构, 是由于两段式 SIR 的耦合系数不足, 如图4所示。从图4可以看出, 在相同的谐振器间距下, 传统结构相比于 SIR 结构有更大的耦合系数, 即达到相同的耦合系数时, 传统结构需要谐振器间距最大, 两段 SIR 次之, 三段 SIR 最小。由此可以推出, 虽然 SIR 结构增加了谐振器的宽度, 但同时也降低了谐振器的间距, 从而减小了滤波器沿谐振器宽度方向的尺寸扩展。采用三段 SIR 结构相比于两段 SIR 结构能够更大程度地压缩整体的面积。

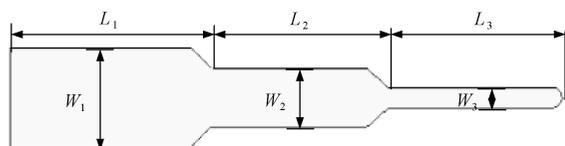


图3 三段式SIR结构及尺寸
Fig. 3 Three-section SIR structure and dimensions

采用三段 SIR 结构还有另一个好处就是提升结构设计的自由度。对于窄带滤波器而言, 往往会出现调整某一个结构尺寸以达到某一参数要求而不满足另一参数要求, 通过增大设计自由度能够有效对滤波器性能参数进行分配, 从而降低设计难度。由图3可以看出, W_1 会同时影响中心频率和耦合效率(可认为是插入损耗), W_2 会同时影响耦合效率和带内波动, W_3 会同时影响中心频率、带内波动和耦合效率, L_1 、 L_2 会影响中心频率, L_3 会影响中心频率和耦合效率。

SIR 结构尺寸如表1所示, 较窄端为接地端。为减小阻抗突变带来的影响, 在阻抗阶跃处进行了切角处理。该结构的谐振频率约为 2.5 GHz, 而与之具有相同谐振频率

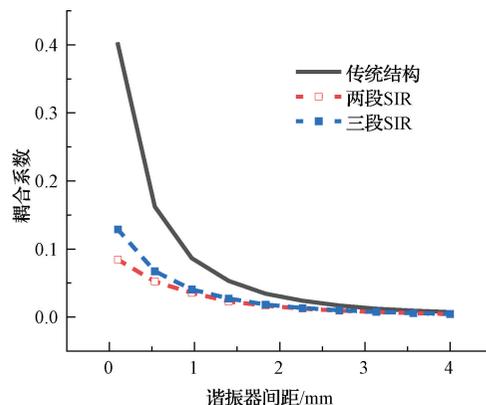


图4 SIR结构与传统结构耦合系数对比
Fig. 4 Comparison of coupling coefficients between SIR and conventional structures

的传统谐振器尺寸为 16.8 mm × 1 mm, 与传统谐振器相比, 长度缩减了 23.2%。

表1 SIR结构尺寸
Table 1 SIR structure dimensions (mm)

尺寸名称	数值	尺寸名称	数值
W_1	2.4	L_1	4.8
W_2	1.4	L_2	4.2
W_3	0.5	L_3	3.9

2 滤波器仿真结果及分析

该滤波器用于某导航设备的电磁干扰抑制, 根据该设备的信号制式, 确定滤波器设计指标为中心频率 2.5 GHz, 带宽 150 MHz, 阻带抑制 ≥ 20 dB (频率 ≤ 2.2 GHz、 ≥ 2.8 GHz), 通带内插入损耗不大于 4.5 dB。利用 CST 建立了五阶传统微带交指滤波器和三段式 SIR 交指滤波器模型, 选用的介质基板为 Rogers 4350B, 该基板相对介电常数为 3.66, 厚度为 0.508 mm, 馈电端为 50 Ω 微带线。滤波器采用对称结构, 取通带波纹 0.1 dB 的切比雪夫滤波器, 对应的原型参数为 $g_1 = g_5 = 1.1468$, $g_2 = g_4 = 1.3712$, $g_3 = 1.975$, 计算得出耦合系数为 $K_{12} = 0.0478$, $K_{23} = 0.0364$, 由于结构对称, 另一边耦合系数与此相同。图5所示为 CST 中建立的 SIR 滤波器模型, 其中馈电端远离接地端, 接地端为窄头端, 所有谐振器交叉排列。为增加耦合效率, 将第2级和第4级谐振器向下平移 0.5 mm。

建模后需要对滤波器的尺寸进行优化, 这主要是因为耦合系数的计算是基于理想条件的结果, 但微带线结构是一种开放结构, 在仿真中会引入非理想耦合的因素从而对耦合系数产生影响。如耦合系数计算仅考虑了相邻两个谐振器相互耦合的问题, 但没有考虑到多个不相邻谐振器耦合的因素, 因此按照理论计算出的尺寸仿真滤波器会有

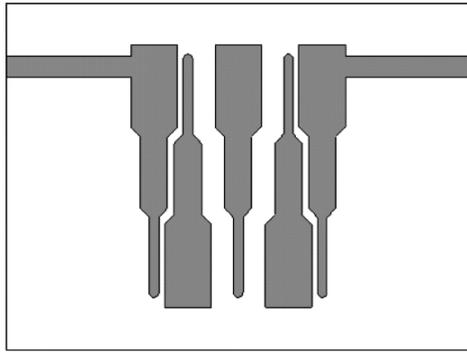


图5 SIR滤波器的仿真模型

Fig.5 Simulation modeling of SIR filter

较大的误差。

SIR谐振器的尺寸已知,该尺寸为经过优化后的结果。优化后 SIR 谐振器的间距 $d_{12} = 0.3 \text{ mm}$, $d_{23} = 1.2 \text{ mm}$,其中 d_{12} 会影响耦合效率, d_{23} 会影响带内波动。微带线宽度为 1.1 mm ,馈电微带线与基板边沿的距离为 2.1 mm ,SIR 滤波器的整体尺寸为 $24 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ 。图6所示为 SIR 滤波器的 S 参数仿真结果。从图6可以看出,该滤波器在通带范围内插入损耗小于 2 dB ,回波损耗大于 20 dB 。在 2.2 GHz 处带外抑制约为 22 dB , 2.8 GHz 处带外抑制为 27 dB ,满足设计指标。该滤波器在通带左侧和右侧的抑制性能有所差异,这是由交指滤波器自身特性所引起的。

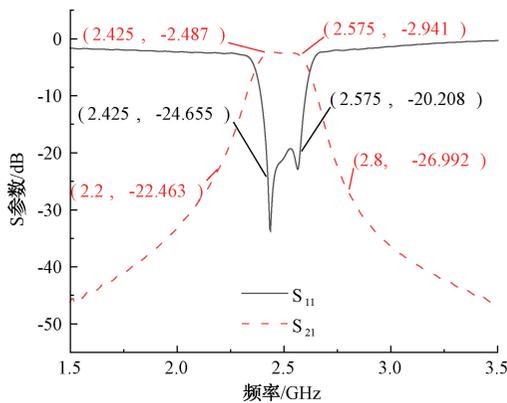


图6 SIR滤波器的 S 参数仿真结果

Fig.6 S-parameter simulation results of SIR filter

基于相同设计指标,对比仿真了传统微带交指滤波器,如图7所示。传统滤波器和 SIR 滤波器的仿真结果对比如图8所示。从图8可以看出,SIR 滤波器与传统滤波器在通带内响应情况无明显区别,但具有更高的回波损耗,在中心频率处回波损耗相差约 8 dB ;传统结构的带外抑制性能在高频段更佳,两者最大处相差约 10 dB ,但在低频段更差,两者最大处相差约 5 dB ,同时传统结构的响应对称性相对较差。由此可以说明,SIR 结构不会影响滤波器通带内的性能,同时能够有效减小滤波器的尺

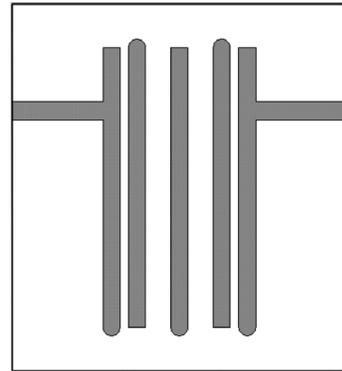
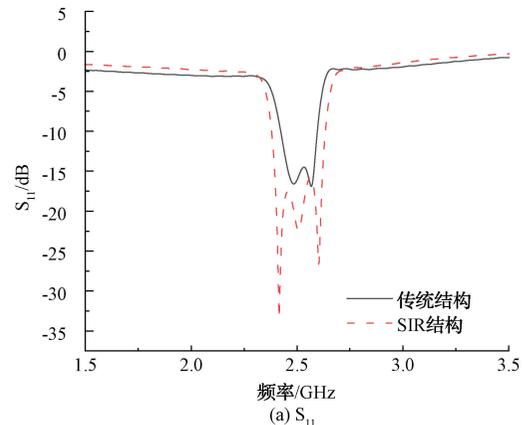
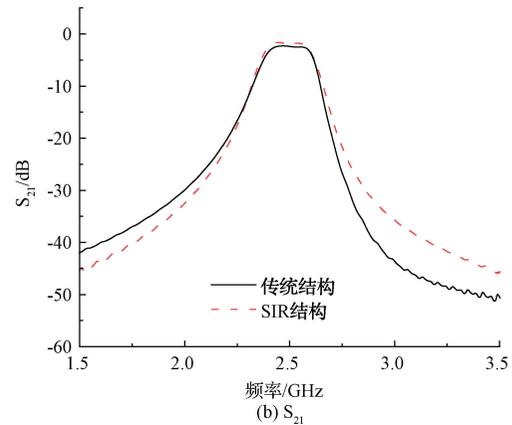


图7 传统结构交指滤波器仿真模型

Fig.7 Simulation modeling of conventional cross-finger filter



(a) S_{11}



(b) S_{21}

图8 传统结构与 SIR 结构 S 参数对比

Fig.8 Comparison of S-parameters between conventional and SIR structure

寸,但是会牺牲一部分高频带外抑制性能。之所以高频性能会变差,主要是因为 SIR 结构将传输零点移动到更高频段,从而导致衰减曲线的下落速度减缓,也同时改进了响应对称性。总体来看,所有性能指标仍满足设计需求,说明利用 SIR 结构实现交指滤波器小型化的方法具有可行性。

传统结构滤波器与 SIR 结构滤波器的参数对比如表 2 所示。由表 2 可知,SIR 结构相比于传统结构既能减小总面积,同时在通带内性能比传统结构更佳。

表 2 传统结构与 SIR 结构的性能对比

Table 2 Performance comparison between conventional and SIR

	传统结构	SIR 结构
谐振部分长度/mm	16.8	12.9
谐振部分宽度/mm	9.2	10.9
通带损耗/dB	≤2.5	≤1.9
通带平坦度/dB	≤1	≤0.5
响应对称性	弱	强

3 滤波器加工及实测验证

实际加工出的滤波器如图 9 所示,谐振结构尺寸为 10.9 mm×13.6 mm,基板材质及厚度与仿真设置相同,为了在两端使用 SMA 接头进行微带一同轴转换,电路板尺寸比谐振结构扩大许多,为 24 mm×18 mm。两端与矢量网络分析仪连接进行测试,测试结果与仿真结果对比如图 10 所示。从对比结果看,实测结果比仿真结果的回波损耗性能有所下降,在中心频率处相差 10 dB,这主要是由于为了便于测试,将滤波器两段抽头设计较长,实测结果插入损耗更大,在通带内实测比仿真大 1.5 dB 左右,这主要是由于仿真条件较为理想,但实际测试中同轴-微带转换和微带抽头都会带来较大的插入损耗,在后续过程中可对电路板结构和 SMA 转换头尺寸进行改进以减小滤波器以外结构对插入损耗的影响;在 2.425 和 2.575 GHz 处插入损耗分别为 3.2 和 3.5 dB,通带内插入损耗小于 4 dB;在带外抑制方面,当频率 ≤2.2 GHz 或 ≥2.7 GHz 时,带外抑制能力为 23 dB,可有效削弱带外信号;从整体趋势看,仿真和实测结果基本吻合,且实测结果能满足设计指标。此外,该滤波器的窄带特性明显,其相对带宽仅为 6%。

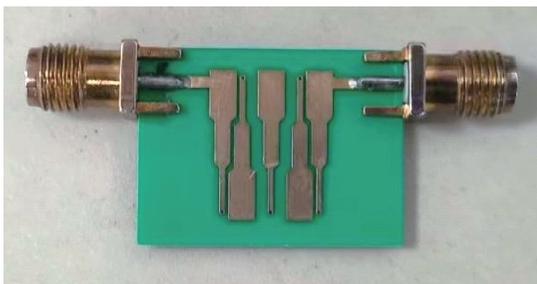


图 9 滤波器实物

Fig. 9 Physical picture of the filter

表 3 为本文与其他文献所设计滤波器的对比,由于工艺不同,尺寸对比统一采用谐振结构尺寸,其中 λ_g 为以中

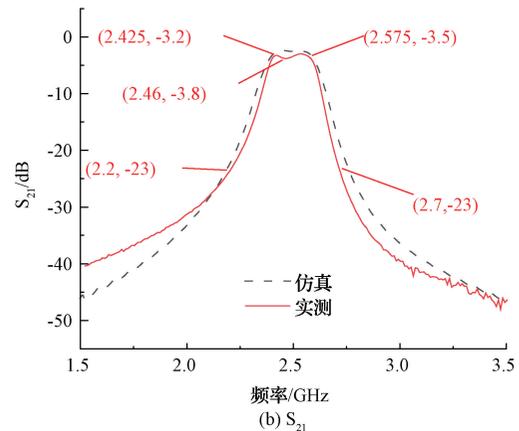
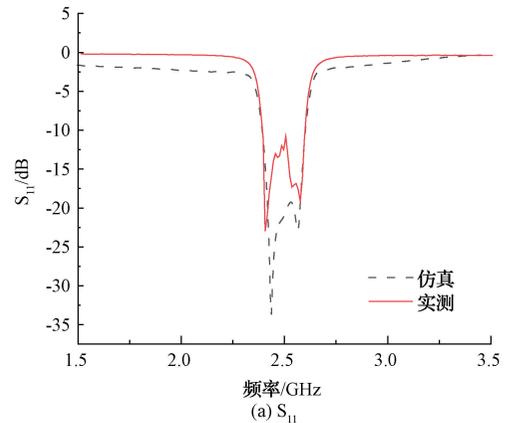


图 10 仿真与实测 S 参数对比

Fig. 10 Comparison of simulated and measured S-parameters

心频率为基准计算出的工作波长。由表 3 可以看出,本文所设计的滤波器具有极强的窄带滤波特性,相对带宽仅为 6%,同时在尺寸方面也有较大的优势,表明本文所采用的设计思路能够用于实现窄带滤波器的小型化。

表 3 本文设计滤波器与其他滤波器性能对比

Table 3 Comparison of the performance of the filter designed in this paper with other filters

滤波器	工艺	中心频率/GHz	相对带宽/%	尺寸
本文	PCB	2.5	6	$0.09\lambda_g \times 0.11\lambda_g$
文献[15]	PCB	3	67	$0.53\lambda_g \times 0.16\lambda_g$
文献[19]	薄膜	3.95	20.3	$0.21\lambda_g \times 0.16\lambda_g$
	激光打孔			
文献[20]	双面溅射 光刻腐蚀	8.95	25.1	$0.17\lambda_g \times 0.12\lambda_g$
文献[21]	薄膜	3.7	27	$0.13\lambda_g \times 0.10\lambda_g$
文献[22]	PCB	7	28.6	$0.21\lambda_g \times 0.11\lambda_g$

4 结论

本文使用三段式 SIR 结构设计了一款窄带微带交指滤波器,与同性能传统交指滤波器相比,将谐振器的长度缩减了 23.2%,实现了滤波器的小型化设计。与传统滤波器相比,多段式 SIR 滤波器具有更平坦的带内响应、更小的通带损耗和更对称的频率响应。对滤波器进行了加工和实测,电路板尺寸为 24 mm×18 mm×0.508 mm,实测结果与仿真结果对比表明,二者在通带处差异小于 1.5 dB,且在整体趋势上保持一致。结果表明,使用多段 SIR 结构能够有效减小滤波器的尺寸能够优化通带内性能,使用该方法设计微带交指滤波器具有较强的实用意义。后续可通过优化尺寸或排列方式等手段调整结构以减小带内损耗,或通过薄膜工艺重新加工制备,从而进一步提升该滤波器的通带性能。

参考文献

- [1] 朱梦梦,翟少磊,朱全聪,等. 直流电子式电压互感器阶跃响应特性现场试验方法及装置[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2): 193-200.
- ZHU M M, ZHAI SH L, ZHU Q C, et al. A field test method and device for step response characteristics of DC electronic voltage transformer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 193-200.
- [2] 胡利稳,蒋品群,宋树祥,等. 基于 CMOS 传输门的带通-带阻可重构 N 通道滤波器[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(9): 60-65.
- HU L W, JIANG P Q, SONG SH X, et al. Band-pass and band-stop reconfigurable N-path filter based on CMOS transmission gate[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(9): 60-65.
- [3] 刘天康,刘海文. 高温超导滤波器在电磁抗干扰中的技术和应用[J]. 空间电子技术, 2023, 20(6): 131-137.
- LIU T K, LIU H W. Technology and application of high-temperature super conducting filter for radio anti-interference[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(6): 131-137.
- [4] 鲁醒悟. 有源滤波器在海上平台电网的应用[J]. 电器工业, 2024(2): 65-68.
- LU X W. Application of active filters in offshore platform grids[J]. China Electrical Equipment Industry, 2024(2): 65-68.
- [5] IVANOV N V. A new approach to microstrip coupled-resonator bandpass filter design[C]. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2018: 201-203.
- [6] 黄宇,王琼,严南,等. 平行耦合微带带通滤波器的设计与仿真[J]. 计算机技术与发展, 2021, 31(2): 180-184, 190.
- HUANG Y, WANG Q, YAN N, et al. Design and simulation of parallel coupled microstrip bandpass filter[J]. Computer Technology and Development, 2021, 31(2): 180-184, 190.
- [7] 徐朕,徐晓英. 基于双枝节“U”型谐振器的双频段微带带通滤波器[J]. 固体电子学研究与进展, 2017, 37(4): 261-265.
- XU ZH, XU X Y. Dual-band microstrip bandpass filter based on dual-stub resonator[J]. Research & Progress of SSE, 2017, 37(4): 261-265.
- [8] 高明明,张雪曼,南敬昌. 采用阶梯 T 型谐振器的双陷波 UWB 滤波器[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 187-194.
- GAO M M, ZHANG X M, NAN J CH. Double notch bands UWB filter using stepped T-shaped resonator[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 187-194.
- [9] CHEN Y D, LIU C H. Exploiting Hi-Lo inter-digital DGS for high-order microstrip bandpass filters[C]. 2016 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), 2016: 83-84.
- [10] YANG L, GÓMEZ-GARCÍA R. High-order quasi-elliptic-type single-ended and balanced wideband bandpass filters using microstrip-to-microstrip vertical transitions[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2023, 70(4): 1425-1429.
- [11] 王世敏,刘君. 高选择性的紧凑型 WLAN 微带带通滤波器设计[J]. 电子器件, 2022, 45(3): 545-550.
- WANG SH M, LIU J. Design of compact WLAN microstrip band-pass filter with high selectivity[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2022, 45(3): 545-550.
- [12] MANSOUR G, RAHIM M K A, ALDEEB H A. Cross-coupled microstrip bandpass filters with finite frequency transmission zeros[C]. 2021 IEEE 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering MI-STA, 2021: 684-688.
- [13] TANTIVIWAT S, RAZALLI M S, IBRAHIM S Z. Miniature microstrip bandpass filters based on quadruple-mode resonators with less via[C]. 2017 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM), 2017: 1-4.
- [14] 彭黎黎,董思乔,唐清华. Ku 频段微带带通滤波器的设计与实现[J]. 信息与电脑(理论版), 2022, 34(3): 210-213.
- PENG L L, DONG S Q, TANG Q H. Design and

- implementation of Ku band high performance spurious suppression micro-strip filter[J]. *China Computer & Communication*, 2022,34(3):210-213.
- [15] 傅世强,赵宇,房少军.一种S波段小型宽带微带带通滤波器优化设计[J].*微波学报*,2021,37(5):77-80,86.
FU SH Q, ZHAO Y, FANG SH J. Optimized design of an S-band compact and broadband microstrip bandpass filter [J]. *Journal of Microwaves*, 2021, 37(5):77-80,86.
- [16] ZHANG M, LI M, ZHANG P, et al. A Novel miniaturized bandpass filter basing on stepped-impedance resonator[J]. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2021, 97:77-85.
- [17] AI J, ZHANG Y H, XU K D, et al. Miniaturized frequency controllable band-stop filter using coupled-line stub-loaded shorted SIR for tri-band application [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, 27(7):628-629.
- [18] 杨新宇.一种新型SIR交指微带带通滤波器的设计[J].*现代电子技术*,2023,46(11):171-174.
YANG X Y. Design of a novel interdigital microstrip bandpass filter with SIR [J]. *Modern Electronics Technique*, 2023,46(11):171-174.
- [19] 韩威,贾世旺,魏浩,等.一种小型化SIR交指带通滤波器设计[J].*电子测量技术*,2023,46(15):26-31.
HAN W, JIA SH W, WEI H, et al. Design of a miniaturized SIR interdigital bandpass filter[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(15): 26-31.
- [20] 刘明辉,袁海,吴思诚,等.陶瓷基微带带通滤波器的设计与制备[J].*电子工艺技术*,2024,45(2):41-43,58.
LIU M H, YUAN H, WU S CH, et al. Design and fabrication of microstrip band-pass filter on ceramic substrate[J]. *Electronics Process Technology*, 2024, 45(2):41-43,58.
- [21] 唐陆瑶,江肖力,刘巍巍.基于薄膜工艺的C频段交指滤波器小型化设计[J].*电子测量技术*,2021,44(16):86-90.
TANG L Y, JIANG X L, LIU W W. Design of miniaturized C-band interdigital filter based on thin film process[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021,44(16):86-90.
- [22] 高梓杰,孙琳琳,楚然,等.基于微波多层结构的折叠型交指滤波器[C].2020年全国微波毫米波会议,2020:841-843.
GAO Z J, SUN L L, CHU R, et al. Folding cross finger filter based on microwave multilayer structure[C]. *China Microwave week(CMW2020)*, 2020:841-843.

作者简介

韩昌霖,硕士研究生,主要研究方向为集成电路电磁兼容与防护。

E-mail:853820421@qq.com

吴建飞(通信作者),博士,副研究员,主要研究方向为物联网、传感器、电磁兼容等。

E-mail:wujianfei990243@126.com

郑亦菲,博士研究生,主要研究方向为集成电路电磁兼容与建模。

E-mail:zhengyifei0218@163.com

陈乐东,博士研究生,主要研究方向为集成电路测量系统设计与标定。

E-mail:chenledongnudu@163.com

丁浩,博士,讲师,主要研究方向为高速集成电路设计。

E-mail:dhaoafeu@126.com