

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210249

基于中心对称结构的带宽可重构滤波器设计

凌锐 于映

(南京邮电大学集成电路科学与工程学院 南京 210023)

摘要: 为适应需求日益复杂的无线通信环境,充分利用紧缺的频谱资源,设计实现了基于中心对称结构及变容二极管的电可调微带通滤波器。通过电磁仿真软件 HFSS 进行仿真实验,在加载枝节的开口环谐振器结构上,引入叉指结构和马刺线型耦合馈线完成滤波器的原型设计。在原有的基础上加入可调节电容值的变容二极管,调节低频传输零点,实现通带带宽可重构,从而达到灵活控制滤波性能的目的。实际测试表明该滤波器的初始相对带宽为 5.1%,初始绝对带宽为 170 MHz,变容二极管调节绝对带宽在 140~200 MHz 范围内,即 82.4%~117.6%,中心频率在 2.70~2.76 GHz,传输零点调谐范围在 2.57~2.63 GHz,通带内插入损耗在 0.9~1.5 dB,回波损耗在 10~35 dB,测试结果与仿真基本相符,在 S 波段的带宽精密控制方向具有一定应用前景。

关键词: 变容二极管;带宽可重构;传输零点;带通滤波器;中心对称

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

Design of bandwidth reconfigurable filter based on centrosymmetric structure

Ling Rui Yu Ying

(College of Integrated Circuit Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to adapt to the increasingly complex wireless communication environment and make full use of the scarce spectrum resources, this paper designs and implements an electrically tunable microstrip bandpass filter based on centrosymmetric structure and varactor diodes. The electromagnetic simulation software HFSS is used to conduct simulation experiments. On the split ring resonator structure loaded with branches, an interdigital structure and a spur-shaped coupled feeder are introduced to complete the prototype design of the filter. On the basis of the original, a variable capacitance diode with adjustable capacitance value is added to adjust the low-frequency transmission zero point to realize the reconfiguration of the passband bandwidth, so as to achieve the purpose of flexibly controlling the filtering performance. The actual test shows that the initial relative bandwidth of the filter is 5.1%, the absolute bandwidth is 170 MHz, the absolute bandwidth adjusted by the varactor diode is in the range of 140~200 MHz, that is, 82.4%~117.6%, the center frequency is in the range of 2.70~2.76 GHz, and the transmission zero point tuning range is 2.57~2.63 GHz, the insertion loss in the passband is in the range of 0.9~1.5 dB, and the return loss is in the range of 10~35 dB. The test results are basically consistent with the simulation, and it has certain application prospects in the direction of precious bandwidth control in the S-band.

Keywords: centrosymmetric; varactor diode; reconfigurable bandwidth; transmission zero; bandpass filter

0 引言

在社会信息化快速稳固的进程中,无线通信技术作为传播信息的主要媒介也得到了快速发展与运用。其中滤波器作为无线通信系统的关键组件,在滤除杂波、保证传输质量效率方面有着不可或缺的作用^[1]。然而由于通信环境日益复杂多变,以及信息化后对无线信号传输精度与品

质要求逐步提高,传统滤波器不可调节的滤波性能已无法满足要求。

因此性能可重构已逐渐成为新型滤波器件的重要设计方向。可重构射频滤波器的优势在于可灵活应对实际通信应用中不同的性能需求,其不仅可以简化电路设计,还优化了系统体积,进一步降低成本^[2]。当前国内外可重构滤波器的研究主要有单通带、多通带的性能实现,以及中心频

收稿日期:2022-06-08

率、带宽、传输零点 3 个重构方向。其中典型的是通过加载变容二极管控制奇偶模谐振频率从而实现中心频率可调^[3],其所采用的奇偶模分析法提供了便捷易懂的谐振器分析思路和调节原理,但仅限于轴对称结构的设计分析。且相较于中心频率而言,带宽和传输零点的重构实现难度更大,有学者提出了通过在缺陷地结构上加载 pin 管,实现双带宽切换的中心频率可调节^[4],但无法实现带宽的连续可调。常见的设计是在对称阶梯阻抗结构末端加载变容二极管^[5]影响其多模谐振频率,通过调节电容值重构带宽,其调节变化较大,不适合应用在有一定精度要求的应用场景。

本文提出了一种中心对称并加载变容二极管的带宽可重构带通滤波器。该设计不限制在轴对称结构范围内,通过在基本的中心对称谐振器上加载叉指结构以及平行耦合馈线上的马刺线结构增强耦合,在构建多条耦合路径的同时,引入传输零点,提高带外抑制性能与选择性。并通过变容二极管引入结构外的可持续变化的电长度,实现调节传输零点,最终达到以较高的调节精度实现带宽重构的设计目的。为了证明这一设计的可实现性,进行了实际加工测试,测试结果与仿真结果有较高吻合度。

1 谐振器设计与分析

1.1 谐振器结构

本文采用 1/4 波长均匀阻抗开口环内加载开路枝节的基础结构加载,并在环内非轴对称位置的开路枝节两部分组成,通过 180° 旋转,得到中心对称谐振器结构,增加了信号的传输路径,如图 1 所示。在原型谐振器设计中,通过两端枝节的相互耦合来引入传输零点^[6],实现高选择性,后续进行结构优化,在开路枝节原耦合区域加入叉指结构,增加耦合强度。

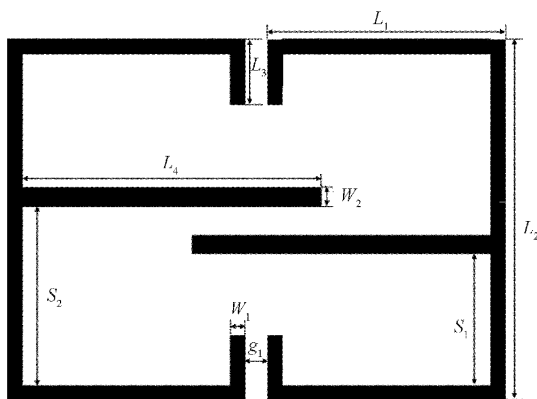


图 1 谐振器结构

1.2 谐振器频率分析

单个谐振器的等效电路,如图 2 所示,由于采用的谐振器为非轴对称结构,故奇偶模分析方法不再适用。

由示意图可知,单个谐振结构可等效为三段电长度不同的传输线串并联构成, Y_1 为均匀阻抗传输线的电导, Y_2 为加载在该传输线上的枝节的电导,根据传输线理论以及

阻抗谐振器理论可进行以下分析。

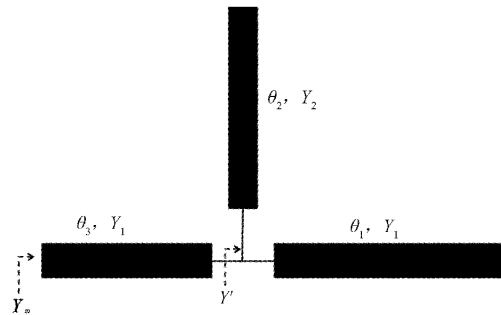


图 2 单个谐振器等效示意图

将等效结构右端看作电长度为 θ_1 和 θ_2 的传输线并联,其得到的输入导纳 Y' 可以表示为式(1):

$$Y' = jY_2 \tan \theta_2 + jY_1 \tan \theta_1 \quad (1)$$

进而由 Y' 与电长度 θ_3 串联得到单个结构谐振器的总输入导纳:

$$Y_m = jY_1 \frac{Y_1 \tan \theta_3 + Y'}{Y_1 - Y' \tan \theta_3} \quad (2)$$

根据谐振器的谐振条件 $Y_m = 0$, 可以联立式(1)、(2)得到式(3), 推导后得到该结构的谐振条件式(4):

$$Y_m = jY_1 \frac{Y_1 \tan \theta_3 + j(Y_2 \tan \theta_2 + Y_1 \tan \theta_1)}{Y_1 - j(Y_2 \tan \theta_2 + Y_1 \tan \theta_1) \tan \theta_3} \quad (3)$$

$$\frac{Y_1}{Y_2} = \frac{\tan \theta_2}{j \tan \theta_2 - \tan \theta_1} \quad (4)$$

1.3 引入叉指结构

在原有的谐振器结构基础上,加入叉指结构可进一步增强耦合,产生低频传输零点,提高低频部分带外抑制性能^[7]。其等效电路结构,如图 3 所示,等宽等长等间隙的平行微带线可看作一组平行耦合线阵^[8],其单根微带可以等效为自电容,而相邻微带间的耦合可等效为耦合电容。

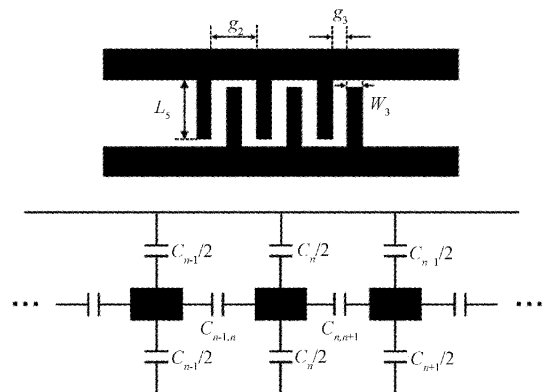


图 3 叉指结构及其等效电路

通过 HFSS 仿真实验可以得到叉指结构尺寸变化对滤波波响应性能的影响,如图 4 所示,随叉指长度 L_5 增加或缝隙宽度 g_3 减小,耦合电容值增大导致耦合强度增大,低频传输零点对低频带外的抑制效果增强,选择性提高。

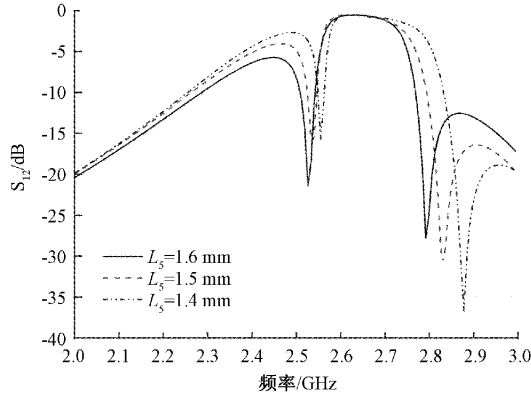


图 4 叉指长度 L_5 对滤波响应性能的影响

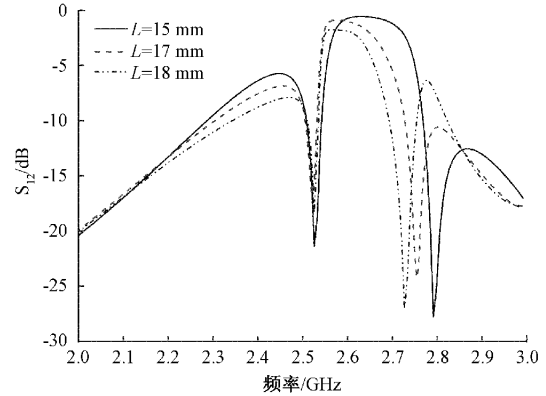


图 6 不同开槽长度 L 下的滤波器响应特性曲线

2 带宽可重构滤波器设计与测试

2.1 滤波器结构

1) 马刺线结构

马刺线是在基础微带线上引入的共面缺陷结构,且由于其本身结构特点,并不会引入新的传输线增大滤波器尺寸,具有紧凑、简单、易集成的优势^[9]。同时马刺线的带隙特性对谐波有良好的抑制效果,减弱杂波干扰,也常用于带阻滤波器的设计以及传输零点的引入。

对该结构进行电路等效进行分析,如图 5 所示,马刺线开槽口缝隙 S 可等效为谐振电容 C 影响电容效应,开槽可等效为谐振电感 L 影响电感效应,并用电阻 R 来等效传输损耗。

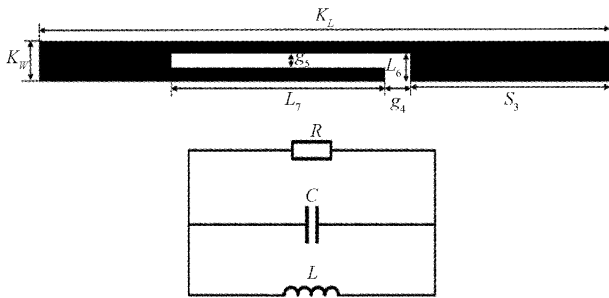


图 5 马刺线及其等效电路

整个加载马刺线的微带结构可看作一个并联谐振电路^[10],影响传输零点分布^[11],谐振频率可由式(5)进行分析。

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (5)$$

通过 HFSS 仿真实验能够清楚地看到马刺线的关键尺寸对滤波器性能的影响。当改变开槽长度以及缝隙宽度时,随着开槽长度 L 的增长,高频传输零点向低频移动,如图 6 所示,或随缝隙宽度加宽,向高频移动。(图中 L 为 L_7 与 g_4 长度之和,即开槽长度)

2) 滤波器结构分析

本文设计的基于变容二极管的带宽可重构带通滤波器

及其耦合拓扑结构图,如图 7、8 所示。在中心对称谐振器上加入紧密排布的叉指型结构用来增强耦合,并在平行耦合微带馈线上引入共面缺陷的马刺线结构,通过间隙 F_x 与两谐振器进行信号传输,在保证结构紧凑的同时,提高滤波性能。

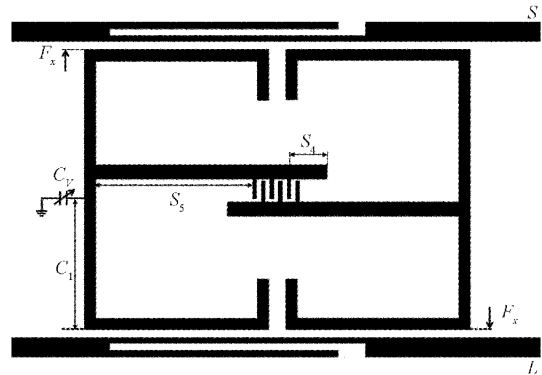


图 7 滤波器结构示意图

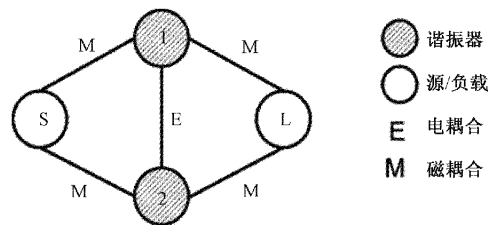


图 8 滤波器耦合拓扑结构图

且根据拓扑图可知,各组件间有多条耦合通路进行信号传输,其中源和负载端馈线与两中心对称谐振器之间以磁耦合为主导,两谐振器之间以电耦合为主导。

2.2 加载变容二极管

变容二极管加载在左侧开口环外侧,通过施加反偏电压调节电容值,从而调节其引入的电长度 θ ,改变谐振器总电导,同时实现传输零点移动,重构带宽。同时依据仿真实验可知,由于谐振器的中心对称特性,使其在另一端谐振器的中心对称处能实现同样的调节效果,实现了变容二极管加载位置选择的灵活性。

结合上述对基础谐振器结构的分析,可推导加载变容二极管的谐振器电路示意图,如图 9 所示,从右到左进行分步计算分析^[12],进一步推导出该谐振器的总输入导纳(式(10)),其中 C_v 为变容二极管的电容值。

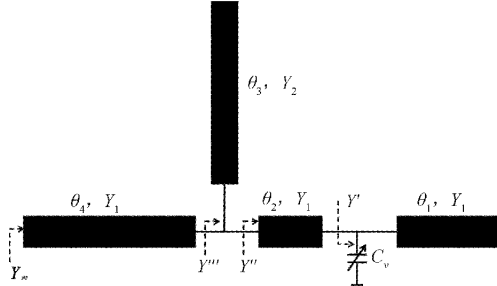


图 9 加载变容二极管谐振器电路示意图

由电长度为 θ_1 的传输线与变容二极管 C_v 并联可以直接推导出 Y' , 如式(6)所示。

$$Y' = jY_1 \tan\theta_1 + j\omega C_v \quad (6)$$

再得到第一部分的等效导纳 Y' 后,根据传输线导纳串联公式,可以推导出由电长度 θ_2 与 Y' 串联得到第二部分的等效导纳 Y'' , 如式(7)所示。

$$Y'' = jY_1 \frac{Y_1 \tan\theta_2 + Y'}{Y_1 - Y' \tan\theta_2} \quad (7)$$

第三部分的等效导纳 Y''' , 由一段电长度为 θ_3 的传输线与 Y'' 并联得到,如式(8)所示。

$$Y''' = jY_2 \tan\theta_3 + Y'' \quad (8)$$

整体部分的总导纳由一段电长度为 θ_4 的传输线与 Y''' 串联得到,如式(9)所示。

$$Y_{in} = jY_1 \frac{Y_1 \tan\theta_4 + Y'''}{Y_1 - Y''' \tan\theta_4} \quad (9)$$

最后,联立式(6)~(9),可以推得展开式,如式(10)所示。

$$Y_{in} = jY_1 \frac{Y_1 \tan\theta_4 + j(Y_2 \tan\theta_3 + Y_1 \frac{Y_1 \tan\theta_2 + jY_1 \tan\theta_1 + j\omega C_v}{Y_1 - (jY_1 \tan\theta_1 + j\omega C_v) \tan\theta_2})}{Y_1 - j(Y_2 \tan\theta_3 + Y_1 \frac{Y_1 \tan\theta_2 + jY_1 \tan\theta_1 + j\omega C_v}{Y_1 - (jY_1 \tan\theta_1 + j\omega C_v) \tan\theta_2}) \tan\theta_4} \quad (10)$$

从式(10)中可以看出,调节变容二极管的电容值,确实可以影响部分结构的导纳,从而影响到总导纳,实现调谐目的。

2.3 实物加工与测试结果分析

在运用传输线理论和阻抗谐振分析计算后,得到了谐振器的基本尺寸,通过仿真软件 HFSS 进行尺寸以及引入结构的优化,进一步完善该滤波器的响应性能。

实际滤波器加工尺寸参数如下: $L_1 = 9.7 \text{ mm}$ 、 $L_2 = 13.2 \text{ mm}$ 、 $L_3 = 2 \text{ mm}$ 、 $L_4 = 12.7 \text{ mm}$ 、 $L_5 = 1.6 \text{ mm}$ 、 $L_6 = 0.7 \text{ mm}$ 、 $L_7 = 13.8 \text{ mm}$ 、 $S_1 = 4.9 \text{ mm}$ 、 $S_2 = 7.15 \text{ mm}$ 、 $S_3 = 7 \text{ mm}$ 、 $S_4 = 2.08 \text{ mm}$ 、 $S_5 = 8.82 \text{ mm}$ 、 $W_1 = 0.35 \text{ mm}$ 、 $W_2 = 0.45 \text{ mm}$ 、 $W_3 = 0.2 \text{ mm}$ 、 $g_1 = 11.4 \text{ mm}$ 、 $g_2 = 0.6 \text{ mm}$ 、 $g_3 = 0.2 \text{ mm}$ 、 $g_4 = 1.4 \text{ mm}$ 、 $g_5 = 0.3 \text{ mm}$ 、 $F_x = 0.2 \text{ mm}$ 、 $K_L =$

26 mm 、 $K_w = 1 \text{ mm}$ 、 $C_1 = 5.85 \text{ mm}$, 最终加工的实物,如图 10 所示,图中红线(下)是给变容二极管施加反偏电压的导线,蓝线(上)为接地导线。

加工所采用的介质基板是相对介电常数为 3.55 的 Rogers RO4003,介质损耗角为 0.0027,厚度为 0.508 mm,尺寸为 $28 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$,约等于 $0.24\lambda_g \times 0.21\lambda_g$, λ_g 是 2.6 GHz 频率所对应的波长。

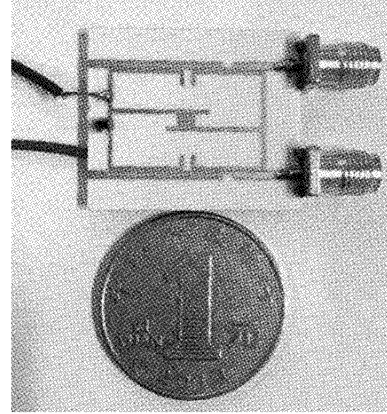


图 10 可重构滤波器实物图

根据仿真实验进行实际加工测试,最终测试结果与仿真结果对比,如图 11 所示。从图中可以看出未加变容二极管的基础带通滤波器仿真结果与实际测量结果基本一致,中心频率为 2.63 GHz,相对带宽为 5.1%,绝对带宽为 170 MHz,插入损耗为 0.8 dB 左右,回波损耗平均达到 15 dB,可以从实际测试结果看出,该通带带外有较好的抑制效果,带内有较好的平坦度,进一步证明了引入特殊结构的有效性。

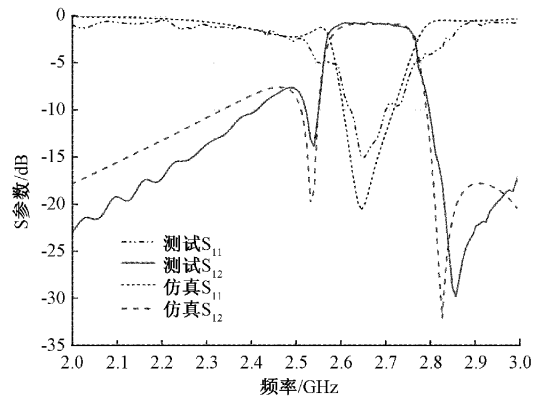


图 11 基础带通滤波器的仿真以及测试结果对比

在原有滤波结构上加载变容二极管,使其具有带宽可重构特性。加载的变容二极管型号为 SMV2020-079LF,在反偏电压调节范围内,电容值呈非线性变化。带宽调节的仿真结果与实际测量结果对比,如图 12、13 所示。可以看出带宽重构的实测整体调节趋势与仿真基本一致,带内平坦度较好,带外抑制效果也略优于仿真,陡直度与选择性都符合预期。但由于集总元件以及电导线带来的损耗,使得

插入损耗不可避免地增大了 0.6 dB 左右,但回波损耗实际测试结果整体优于仿真结果。通过增大反偏电压(2~12 V),变容二极管电容值减小(1.83~0.48 pF),在调整低频传输零点向高频方向移动 60 MHz 的同时,还能够保持高频传输零点稳定不变,最终实现绝对带宽在 82.4%~117.6% 的范围内变化,中心频率也随之偏移 60 MHz。

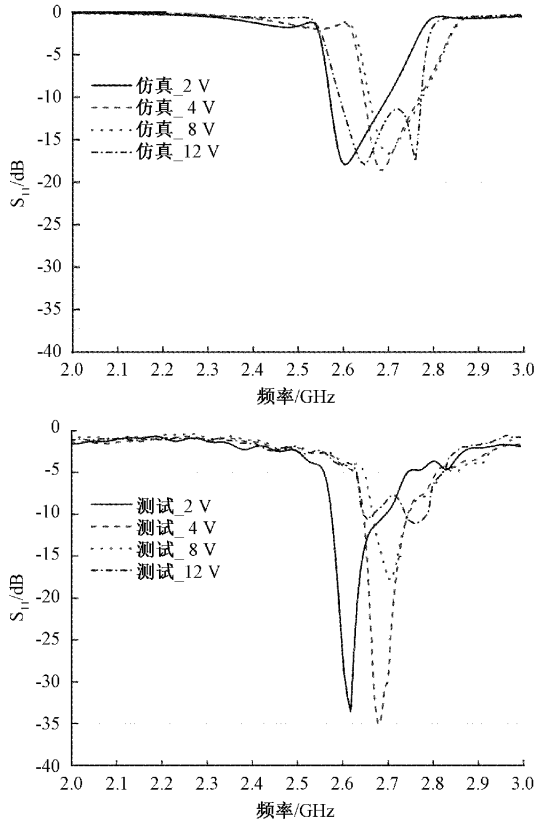


图 12 带宽调节 S11 的仿真以及测试结果对比

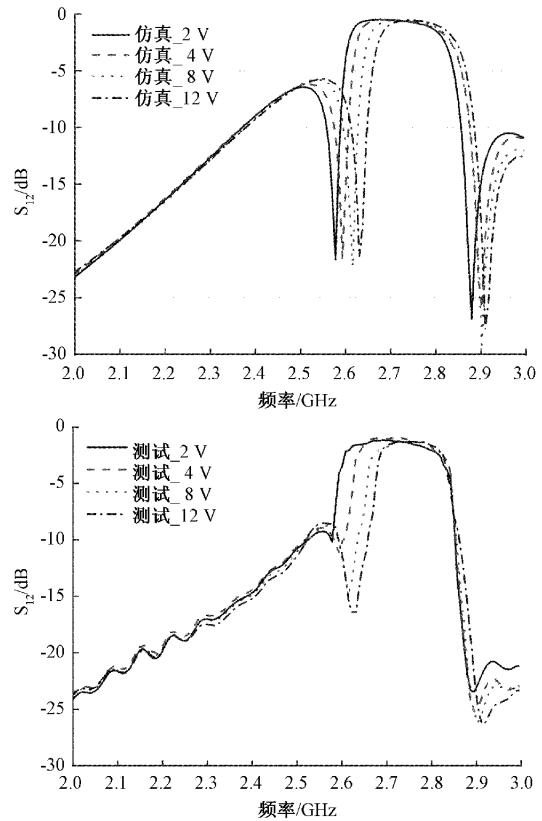


图 13 带宽调节 S12 的仿真以及测试结果对比

最后将本文的结果与其他文献中利用变容二极管实现可重构的带通滤波器做了比较,结果如表 1 所示,可以看出本文所介绍的可调滤波器在相对带宽较窄的情况下,仍能保证一定精度的带宽以及传输零点调节,并保持较低的插入损耗,提高其滤波性能。

表 1 与其他可重构带通滤波器的比较

指标	CF/GHz	FBW	IL/dB	RC	TA(PC)
本文	2.6	5.1%	0.9~1.5	BW、TZ	140~200 MHz(5 MHz/0.1 pF)
文献[13]	1.36	7.4%	2.8~5	CF	1.36~1.78 GHz(20 MHz/0.1 pF)
文献[14]	0.77	18.2%	1~3.1	CF、BW	0.77~1.42 GHz、184~360 MHz
文献[15]	0.36 GHz/0.6 GHz	25.9%/19.2%	2.3~5.8	CF	0.36~0.97 GHz

注:CF(中心频率);FBW(相对带宽);IL(插入损耗);RC(可重构类型);TZ(传输零点);TA(调节范围);PC(精度);

3 结 论

本文设计实现了一种基于变容二极管和中心对称结构的带宽可重构带通滤波器。该滤波器基础结构紧凑、清晰简单,有较高的设计延展空间,易于后续进一步的性能拓宽。其带内特性稳定,插入损耗较低,带外陡直度和选择性的效果也能满足实际应用需求。

与滤波性能固定不变的传统微带滤波器相比,本文利用性能稳定的变容二极管,实现传输零点和带宽连续调

节,幅度适中,适用于具有一定精度要求的 S 波段通带带宽控制选取。并且通过这种方式重构带宽,可一定程度上简化设计的复杂度以及实现难度。但在实际测试中,集总元件的内阻损耗确实会对基础滤波器件的性能有所影响,使得整体滤波器件的插入损耗略微提高,谐振频率也会产生略微偏移。所以后续在 HFSS 仿真实验时也应将变容二极管的内部结构以及 SMA 接头进行仿真,尽可能地贴近实物测试情况。同时在运用此类元件时如何保持滤波器件的响应稳定,也是实现过程中的一大难点,应在后续

设计中需进一步优化。总而言之,本文设计实现的带宽可重构滤波器整体性能稳定,调节连续平缓且精度较高,在相关研究应用方面有一定研究价值。

参考文献

- [1] 马兴兵. 微带滤波器关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2018,1:129.
- [2] 敖杰峰. 可重构射频滤波器发展现状与趋势的研究[J]. 信息通信, 2019,8:231-232.
- [3] ZHANG F, LI J, ZHAO P, et al. A frequency-tunable high-selectivity dual-band bandpass filter with independently controllable passbands [J]. 2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology(ICMMT), 2018: 1-3.
- [4] 束蛟,张业荣,程崇虎,等. 可切换带宽的可调频率带通滤波器设计[J]. 微波学报, 2017,33(6):45-47.
- [5] ZAKHAROV A, LITVINTSEV S, ILCHENKO M. Transmission line tunable resonators with intersecting resonance regions[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67 (4): 660-664.
- [6] 徐西洋,肖中银. 基于 E 型谐振器的双频带通滤波器的设计[J]. 电子测量技术, 2019,42(16):47-51.
- [7] 何宇红,马哲旺,杨雪霞. 基于微带三模谐振器的超宽带带通滤波器设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(5): 148-153.
- [8] 许万里. 一种叉指结构电极间分布电阻的计算方法[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2012, 11(3): 300-304.
- [9] ZHAO Q S, ZHAO Y, HAN L D, et al. Design of wide stopband filter with tunable center frequency[J]. 11th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2015), 2015: 1-5.
- [10] YU T T, XU F, WU K. A compact bandpass filter with wide stopband and two finite transmission zeros [C]. IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), 2018: 1-3.
- [11] ALRWUILI H G, KALKUR T S. A novel compact dual-band bandstop filter(DBBSF) using spurline & stepped-impedance resonator with a tunable BST capacitors[C]. 2017 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectric (ISAF)/International Workshop on Acoustic Transduction Materials and Devices(IWATMD)/Piezoresponse Force Microscopy (PFM), 2017: 9-14.
- [12] CHAUDHARY G, JEONG Y, LIM J. Harmonic suppressed dual-band bandpass filters with tunable passbands [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(7): 2115-2123.
- [13] WANG S, XIANG Q, FENG Q. A fourth order constant absolute bandwidth tunable bandpass filter with cross-coupling [C]. IEEE MTT-S International Wireless Symposium(IWS), 2019: 1-3.
- [14] CHEN J X, MA Y, CAI J, et al. Novel frequency-agile bandpass filter with wide tuning range and spurious suppression [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6428-6435.
- [15] JUNG M, MIN B. A compact tunable bandpass filter using switchable varactor-tuned dual-mode resonator[C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 2018: 1374-1377.

作者简介

凌锐,工学硕士,主要研究方向为射频滤波器件及其可重构设计。
E-mail:348633846@qq.com