

文章编号: 2096-1618(2025)03-0318-04

一种三模可重构滤波器

周胤良, 陈昌明, 刘贤达, 张雨洋

(成都信息工程大学通信工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:基于椭圆函数原型滤波器,提出一种工作在 200 MHz~2 GHz 三模可重构滤波器。采用 PIN 二极管构成的射频开关加以组合,实现低通滤波、高通滤波、带通滤波 3 种不同模式。通过加载变容二极管,完成其中心频率和带宽调谐。测试结果表明,在 3 种不同模式下,滤波器的通带内插入损耗范围均在 0.78~2.85 dB,回波损耗优于 10 dB;低通滤波器的截止频率在 1.12~1.65 GHz 连续可调,高通滤波器和带通滤波器的通带调谐范围分别为 840 MHz~1.3 GHz 和 870 MHz~1.5 GHz。测试和仿真结果吻合较好,研究成果为可重构滤波器的设计提供一种方案。

关键词:滤波器;可重构;变容二极管;PIN 二极管

中图分类号: TN713

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2025.03.010

0 引言

随着无线多模通信技术的发展,具有可重构功能的滤波器被广泛应用于通信系统^[1-4]。F. Kamrath 等^[5-6]使用腔体结构实现中心频率和带宽的重构,该结构具有插入损耗低的优势,但体积较大。采用八分之一模基片集成波导或微带线加载变容二极管构成的可重构滤波器,具有尺寸小、频率和带宽可调的特点,但只能实现带通滤波一种模式^[7-9]。此外,使用微带线和 PIN 二极管构成的可重构滤波器,可实现 3 种不同滤波器模式切换,而滤波器的频率和带宽的连续可调受限^[10-11]。

本文提出一种由微带线、4 只变容二极管、PIN 二极管构成的三模式可重构滤波器。滤波器电路结构简单,插入损耗低,可实现低通、高通和带通 3 种不同模式滤波器的切换,且滤波器的频率和带宽连续可调。

1 理论分析

图 1 为低、高通滤波器的部分枝节等效电路。令高、低通滤波器部分枝节输入阻抗为 Z_1 和 Z_2 ,工作频率为 ω ,当 L_x 、 L_y 和 ω 不变时,增大 C_x 的值,会增大输

入电阻 Z_1 ,降低传输零点 ω_0 的频率;同理,当 L_z 、 C_y 和 ω 固定时,增大 C_z 的值,会增大输入电阻 Z_2 ,降低传输零点 ω_1 的频率;因而,可以通过改变调谐电容 C_x 和 C_z 值的大小,实现对滤波器截止频率和传输零点的调谐,从而改变滤波器的通带带宽。

$$Z_1 = j(\omega L_x + \omega L_y - \frac{1}{\omega C_x}) \quad (1)$$

$$Z_2 = j(\omega L_z - \frac{1}{\omega C_y} - \frac{1}{\omega C_z}) \quad (2)$$

若令 $Z_1 = 0$, $Z_2 = 0$ 则可得到传输零点:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_x C_x + C_x L_y}} \quad (3)$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{L_z C_z} + \frac{1}{C_y L_z}} \quad (4)$$

将图 1 的枝节进行扩展,得到图 2 所示的频率可调的低通滤波器、高通滤波器的集总参数电路模型,其中电容 $C_1 \sim C_4$ 为可调电容,由变容二极管实现。图 3 为调节电容大小,对高、低通滤波器的频率响应的影响。可见,低通和高通滤波器的截止频率随着电容的增大而降低,同时传输零点的频率也降低。此外,低通和高通滤波器的带外引入两个传输零点,可以增强其带外抑制能力。

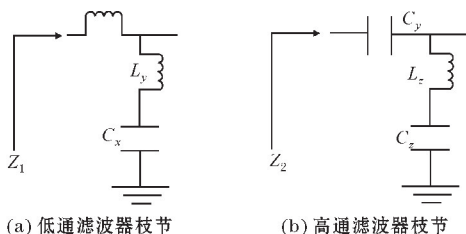


图1 枝节等效电路

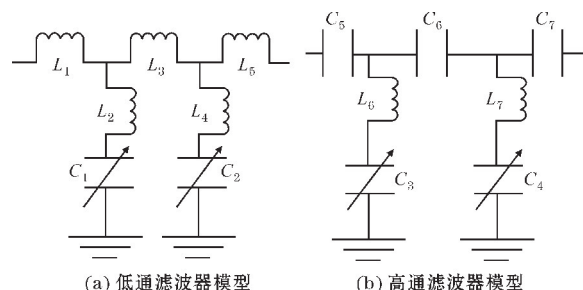
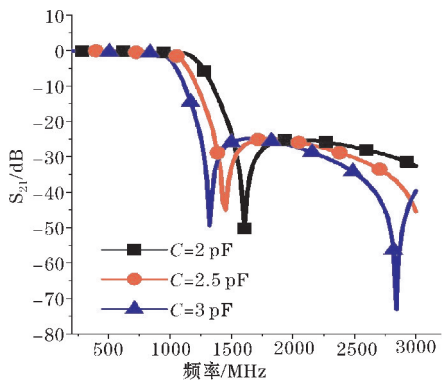
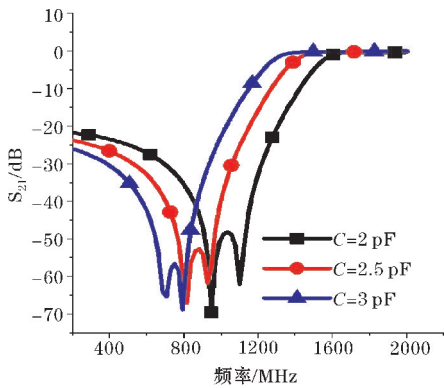


图2 集总参数等效电路



(a) 低通滤波器频率响应



(b) 高通滤波器频率响应

图3 调节电容对频率响应的影响

2 可重构带通滤波器设计

图4为可重构滤波器的结构,由1个频率可调的低通滤波器,1个频率可调的高通滤波器和射频开关(PIN二极管) $S_1\sim S_8$ 构成。通过高/低电平(3.3 V/0 V)对射频开关的控制,完成对滤波器模式的切换。不同模式下开关的工作情况如表1所示。

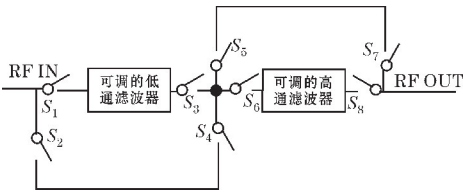


图4 可重构滤波器结构

表1为开关断开和闭合对应的3种模式,分别为模式1(低通滤波器)、模式2(高通滤波器)和模式3(带通滤波器)。

表1 开关工作对应的模式表

模式	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
模式1	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
模式2	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON
模式3	ON	OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON

以模式3为例,开关 S_1 、 S_3 、 S_6 、 S_8 闭合,开关 S_2 、 S_4 、 S_5 、 S_7 断开,器件工作在带通滤波器模式。图5为滤波器电路的示意图。微带线通过优化仿真后的具体尺寸如下: $W_1=0.5\text{ mm}$, $L_1=1.5\text{ mm}$, $L_2=2\text{ mm}$, $W_2=2.3\text{ mm}$, $L_3=4.8\text{ mm}$, $W_3=0.1\text{ mm}$, $L_4=1.8\text{ mm}$, $L_5=4.2\text{ mm}$, $L_6=7.7\text{ mm}$, $W_4=0.2\text{ mm}$, $W_5=1.1\text{ mm}$, $L_7=6.8\text{ mm}$, $L_8=28.5\text{ mm}$, $W_6=1.1\text{ mm}$, $L_9=3.2\text{ mm}$, $W_7=0.7\text{ mm}$, $W_8=0.9\text{ mm}$, $L_{10}=3.8\text{ mm}$ 。电容 C_{dd} 为100 pF, $C_1\sim C_4$ 为变容二极管,直流电压 V_1 和 V_2 为变容二极管偏置电压,电压 $V_3\sim V_8$ 为控制信号,通过输入电压信号(3.3V/0V)控制PIN二极管工作的状态。

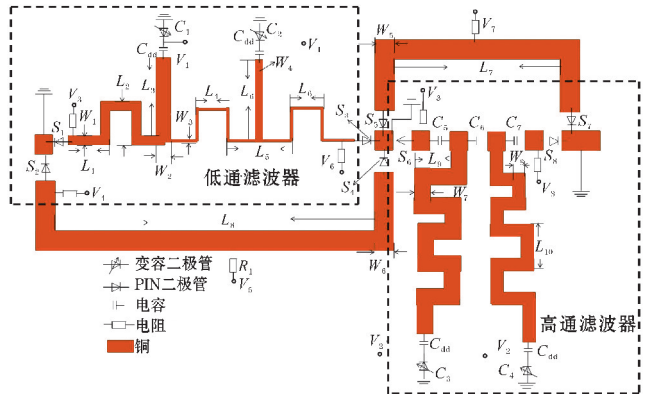


图5 滤波器实物示意图

3 测试结果

图6为所提出的可重构滤波器实物图。介质基板为0.6 mm厚的FR4,相对介电常数 ϵ_r 为4.7,损耗角正切 $\tan\delta$ 为0.02,尺寸42 mm×37.8 mm,相对尺寸为 $0.24\lambda_g\times0.22\lambda_g$ (其中 λ_g 为工作波长)。

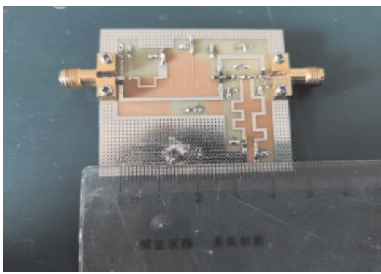


图6 可重构滤波器实物图

图7为工作在3种模式下,滤波器仿真和测试频率响应参数的对比。其中所有的 S_{21} 为插入损耗,全部的 S_{11} 为回波损耗。图7(a)为工作在模式1下的频率响应。由 S_{21} 散射参数可知,滤波器工作频率在200 MHz~2 GHz,通带插入损耗为0.8~1.2 dB,可实现频率1.12~1.65 GHz连续可调,带外抑制优于20 dB。从 S_{11} 散射参数可以得出,回波损耗优于10 dB。模式2为高通滤波器,图7(b)为高通滤波 S

参数仿真和测试结果。从 S_{21} 散射参数中得出,插入损耗为0.78 ~ 1.15 dB,可实现频率840 MHz ~ 1.3 GHz连续可调,带外抑制大于20 dB。从 S_{11} 的频率响应可知通带内回波损耗优于10 dB。模式3为带通滤波器,图7(c)和图7(d)分别为带通滤波器可调中心频率和带宽的仿真和测试结果,其中CF、BW分别表示为滤波器的中心频率和带宽。带通滤波器从图7(c)和

图7(d)中的 S_{21} 参数可以得出,滤波器插入损耗为1.82 ~ 2.85 dB,可实现中心频率870 MHz ~ 1.5 GHz,带宽240 ~ 660 MHz连续可调,带外抑制大于20 dB。此外,该滤波器还在在阻带引入传输零点,有利于提高带外抑制能力。从图7(c)和图7(d)中的 S_{11} 得出,带通滤波器模式下通带内回波损耗优于10 dB。

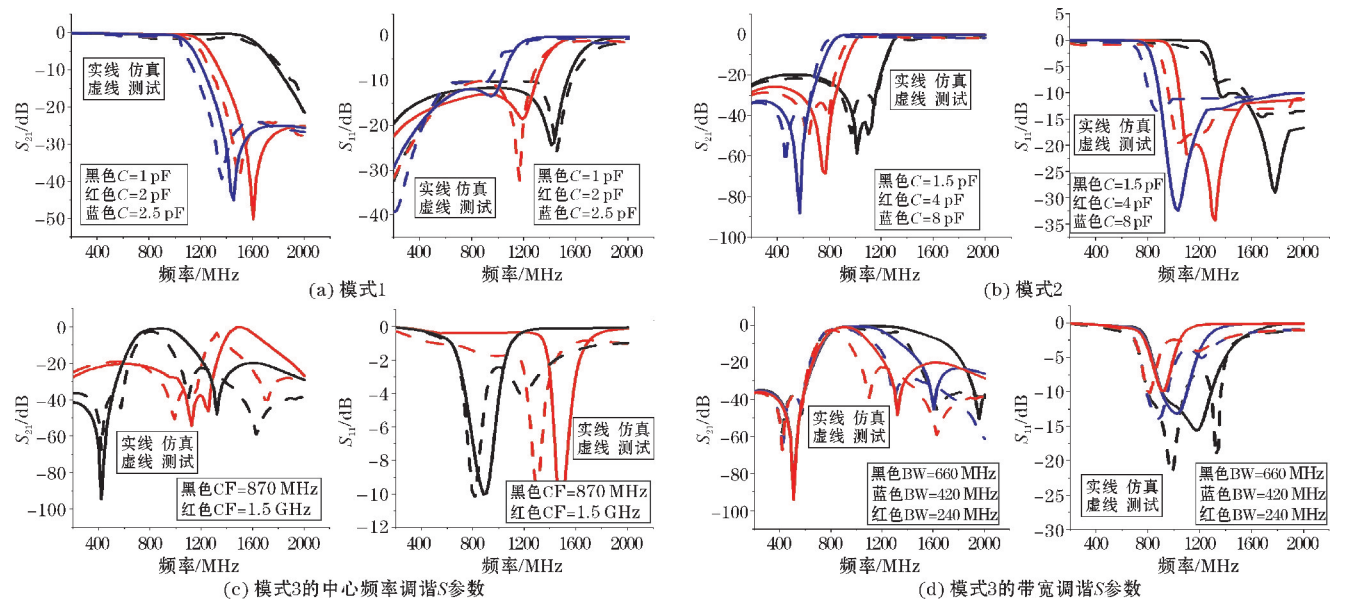


图7 滤波器仿真和测试结果对比

表2为本研究成果和近期同类可重构滤波器的部分测试指标的对比。可见,在具有中心频率和带宽可调的滤波器中,本设计除具有较宽的带宽调谐范围外,还具有多种的不同工作模式。在具有多种模式的滤波器中,所提出的滤波器具有较多或同等数量的不同滤波器特性、较低的插入损耗和每个模式均可调谐的优势。

表2 设计的滤波器和同类滤波器性能对比

文献	IL/dB	Filter mode	CF/GHz	(BW/FBW)/MHz
文献[7]	1.7 ~ 4.8	BPF	2.17 ~ 2.72	231 ~ 355
文献[8]	1.4 ~ 4.5	BPF	0.56 ~ 1.15	65 ~ 180
文献[10]	NA	BSF	NA	NA
		WB-BSF		
		DB-BPF		
文献[12]	0.62 ~ 3	BPF	14.73 ~ 15.85	NA
		DB-BPF		
本文	0.78 ~ 2.85	BPF	0.87 ~ 1.5	240 ~ 660
		LPF		
		HPF		

注:IL为插入损耗,BPF为带通滤波器,BSF为带阻滤波器,WB-BSF为宽阻带带阻滤波器,DB-BPF为双通道带通滤波器,LPF为低通滤波器,HPF为高通滤波器,CF为中心频率,BW/FBW为带宽/相对带宽,Size为滤波器尺寸大小,NA表示未涉及, λ_g 表示工作波长。

4 结束语

本文提出一种工作在200 MHz ~ 2 GHz,且具有低通、高通、带通3种功能的滤波器。该滤波器通过控制PIN二极管完成模式的切换,改变变容二极管偏置电压实现滤波器频率和带宽的调谐。实验测试结果与仿真结果吻合较好,为射频可重构带通滤波器的设计提供了一种方案。

参考文献:

[1] 黄建,钟跃鹏,徐照旭.可重构滤波器研究进展综述[J].微波学报,2020,36(1):142-148.

[2] 李祖炜,周春霞.基于十字形谐振器的W波段可重构滤波器设计[J].微波学报,2023,39(S1):202-205.

[3] 史小卫,郝佳文,魏峰,等.一种具有可重构陷波功能的差分宽带带通滤波器[J].微波学报,2020,36(1):100-102.

[4] Fan M, Song K, Yang L, et al. Frequency-Reconfigurable Input-Reflectionless Bandpass Filter and Filtering Power Divider With Constant Absolute Band-

- width[J]. in IEEE Transactions on Circuits and Systems II:Express Briefs,2021,68(7):2424–2428.
- [5] Kamrath F, Miek D, Boe P, et al. Fully Reconfigurable Bandpass Filter with Coupling Resonators and Arbitrary Transmission Zero Position [C]. 2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 2020:938–940.
- [6] Kamrath F, Bartlett C, Boe P, et al. Reconfigurable Bandpass Filter with Extracted Pole and Coupling Resonators[C]. 2021 IEEE MTT-S International Microwave Filter Workshop (IMFW), 2021:259–261.
- [7] Guo J, You B, Luo G Q. A Miniaturized Eighth-Mode Substrate-Integrated Waveguide Filter With Both Tunable Center Frequency and Bandwidth [J]. in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019, 29(7):450–452.
- [8] Zhang G, Xu Y, Wang X. Compact Tunable Bandpass Filter With Wide Tuning Range of Centre Frequency and Bandwidth Using Short Coupled Lines [J]. in IEEE Access, 2018, 6:2962–2969.
- [9] Wei Z, Yang T, Chi P-L, et al. A 10.23–15.7 GHz Varactor-Tuned Microstrip Bandpass Filter With Highly Flexible Reconfigurability [J]. in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(10):4499–4509.
- [10] 张友俊, 贾式钰. 基于 T 型谐振器的新型可重构滤波器的设计 [J]. 微波学报, 2019, 35(6):61–65.
- [11] Guan H, Liu B. Channel Switchable Filter Design Based on PIN Diode Reconfigurable Microstrip Resonators[C]. 2023 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2023:1–3.
- [12] Lin W, Zhou K, Wu K. Band-Reconfigurable Tunable Bandpass Filters Based on Mode-Switching Concept. in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 71(3):1125–1135.

A Reconfigurable Filter with Three Mode

ZHOU Yinliang, CHEN Changming, LIU Xianda, ZHANG Yuyang

(College of Communication Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: A three-mode reconfigurable filter operating at 200 MHz ~ 2 GHz based on the elliptic function prototype filter is proposed in this paper. By combining radio frequency switches composed of PIN diodes, it can achieve three different modes of filtering: low-pass filtering, high-pass filtering, and band-pass filtering. Tuning of the center frequency and bandwidth is achieved by loading variable capacitance diodes. Test results indicate that the insertion losses within the passband for the filter in the three modes range from 0.78 to 2.85 dB, and the return losses exceed 10 dB. The cutoff frequency of the low-pass filter is continuously adjustable in the range of 1.12 to 1.65 GHz, while the tuning range of the high-pass filter and band-pass filter are 840 MHz to 1.3 GHz and 870 MHz to 1.5 GHz, respectively. Both test and simulation results demonstrate good agreement, validating the effectiveness of the proposed design as a viable solution for reconfigurable filter development.

Keywords: filter; reconfigurability; varactor diode; PIN diode