



·高功率微波技术·

一种高选择性可调带通与带阻可切换滤波器*

杨 红, 张德伟, 王 显, 张俊杰, 周东方, 付宇璠

(中国人民解放军 战略支援部队信息工程大学, 郑州 450001)

摘 要: 设计了一种高选择性可调带通与带阻可切换微带滤波器。在微带谐振器及枝节末端加载变容二极管实现中心频率的可调; 在输入与输出端口馈线之间, 利用 PIN 二极管实现滤波器阻带和通带特性的切换。采用奇偶模的方法对滤波器结构进行分析, 通过对奇偶模频率的调节实现了频率调节过程中的恒定绝对带宽。同时, 在输入与输出馈线间引入源与负载耦合, 使得频带两侧各有一个传输零点, 且传输零点在整个频率调谐范围内相对位置几乎不变。因此, 在整个频率调节范围内, 滤波器实现了高选择性及良好的带外抑制能力。最终设计出的可调带阻滤波器的频率调谐范围为 5.58~5.89 GHz, 绝对带宽 80 MHz±5 MHz, 阻带衰减优于 14 dB; 可调带通滤波器的频率调谐范围为 5.42~5.79 GHz, 绝对带宽 120 MHz±5 MHz, 插入损耗 1.69~2.25 dB, 回波损耗优于 13 dB。同时, 该滤波器具有 $0.28\lambda_g \times 0.62\lambda_g$ (λ_g 是可调频率范围中心频率的波长) 的紧凑结构尺寸。实验和仿真结果一致性较好。

关键词: 带阻滤波器; 带通滤波器; 可切换性; 可调滤波器; 绝对带宽恒定

中图分类号: TN715

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.200327

A highly selective tunable filter with switchable bandpass and bandstop frequency response

Yang Hong, Zhang Dewei, Wang Xian, Zhang Junjie, Zhou Dongfang, Fu Yufan

(PLA Strategic Support Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: A highly selective tunable filter with switchable bandpass (BP)-to-bandstop (BS) frequency response is designed. The frequency of the filter can be adjusted by loading a varactor diode on the end of microstrip resonator and branch; a PIN diode can be used to switch BP and BS characteristics. The filter is analyzed using the even- and odd-mode method, and constant absolute bandwidth (CABW) is achieved. Then, a source and load coupling is introduced so that there is a transmission zero (TZ) on each side of band, which can be almost keep in the same relative position throughout the frequency tuning range (FTR). Therefore, in the FTR, the filter achieves high selectivity and good out-of-band suppression characteristics. The FTR of the proposed filter is 5.58~5.89 GHz, the measured attenuation within the stopband is greater than 14 dB with CABW of (80 ± 5) MHz under BS state; the FTR is 5.42~5.79 GHz, CABW is (120 ± 5) MHz, the measured return loss and insertion loss within the passband are about 13 dB and 1.69~2.25 dB under BP state, respectively. Moreover, the fabricated tunable filter has a compact size of $0.28\lambda_g \times 0.62\lambda_g$ (λ_g is the wavelength of the center frequency during the FTR). The experimental and simulated results are in good agreement.

Key words: bandstop filter; bandpass filter; switchability; tunable filter; constant absolute bandwidth

射频微波滤波器是射频前端通信系统的一个必不可少的重要器件。带通和带阻滤波器在微波毫米波系统中由于其在某些频率范围内具有选择或抑制信号通过的特性而备受关注且已广泛应用^[1-3]。随着无线通信系统的发展, 具备紧凑、低插损、低成本、高性能等特性的可调滤波器备受关注^[4-6]。微带结构由于在平面结构中具备易集成、体积小等优势而广泛应用于滤波器的设计中^[7]。

文献 [8] 在梳状线滤波器末端加载变容二极管实现了宽频率可调带通滤波器。为了在中心频率可调过程中能

* 收稿日期: 2020-12-29; 修订日期: 2021-02-05

基金项目: 核高基重大专项 (2013ZX01010003-004)

作者简介: 杨 红 (1996—), 女, 硕士, 主要从事微波电路方向的研究; 1525600410@qq.com。

维持恒定的带宽,文献[9]使用阶梯阻抗谐振器(Stepped Impedance Resonator, SIR),通过变容二极管控制谐振器间耦合从而实现了绝对带宽恒定的可调带通滤波器。文献[10]在一对平行耦合线谐振器末端及谐振器间加载变容二极管,最终实现了相对带宽恒定的宽可调谐范围的可调带通滤波器。可调带阻滤波器的设计与可调带通滤波器类似,文献[11]在谐振器末端加载变容二极管实现了紧凑的中心频率可调谐的带阻滤波器。文献[12]中利用9对耦合微带谐振器,每对耦合谐振器由一对背靠背的变容二极管构成,实现了高抑制度、宽调谐范围的可调带阻滤波器。在宽频带射频系统中,为了设备能工作在高自动干扰环境中,带通-带阻可切换滤波器的研究得到了广泛关注,文献[13]在输入输出馈线间加载PIN二极管,实现了带通-带阻滤波器的可切换,但并未实现中心频率和带宽的可调。文献[14]设计了一款宽调谐范围的带通-带阻可切换滤波器,但其阻带的频率选择性不好。可调滤波器的研究虽然已经成熟,可切换的带通-带阻滤波器也有学者研究,但是关于可切换并且可调的带通-带阻滤波器^[15-17]的国内外研究却不多。

本文提出了一款高选择性可调带通与带阻可切换微带滤波器。通过使用一个PIN二极管和三个变容二极管实现了通带中心频率可调范围为5.42~5.79 GHz、阻带中心频率可调范围为5.58~5.89 GHz的可调带通带阻可切换微带滤波器。在本设计中,通过引入源与负载耦合,使得通带两侧各有一个传输零点,提高了通带与阻带的选择性及带外抑制度。并且,此滤波器实现了在整个频率调谐范围内绝对带宽几乎保持不变的特性。最后对该滤波器进行了加工,实测和仿真结果具有较好的一致性。

1 滤波器设计与分析

本文提出的可调带通带阻可切换滤波器结构如图1所示,结构可简单分为微带加载枝节谐振器(Stub-Loaded Resonator, SLR)、输入输出馈线、变容二极管及PIN二极管、偏置电路等四个部分。三个变容二极管加载在微带线谐振器及枝节末端用于带通与带阻滤波器中心频率的调节,通过控制三个变容二极管的偏置电压即可实现容值的调节。在输入与输出馈线间加载PIN二极管可实现带通与带阻特性的切换,当PIN二极管正向偏置时,输入馈线与输出馈线相连接,信号可从输入端口直接传输到输出端口,此时滤波器呈现带阻特性;当反向偏置时,PIN二极管断开,此时切换为带通特性。并且在输入与输出馈线之间存在源与负载耦合路径,因此可以产生传输零点,使得选择性和抑制能力得以提升。此外,电路中的定值电容 C_b (和 C_1)以及定值电阻 R_b 分别起到了隔直及直流偏置的作用。

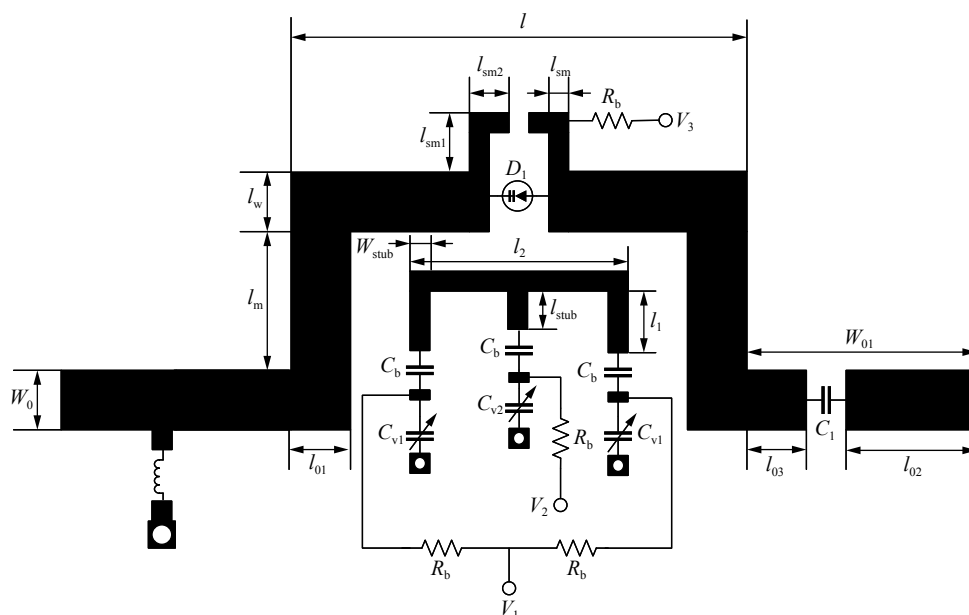


Fig. 1 Schematic diagram of proposed tunable filter

图1 可调滤波器结构图

1.1 可调谐振器分析

对于两端开路SLR,谐振器奇、偶模谐振频率分别主要与微带线长度、枝节长度有关。所以可通过在微带线及开路枝节末端加载变容二极管来实现长度的等效变化,以此获得谐振频率的可调。谐振频率分别随枝节长度 l_{stub} 及微带线长度 l_1 的变化如图2所示。

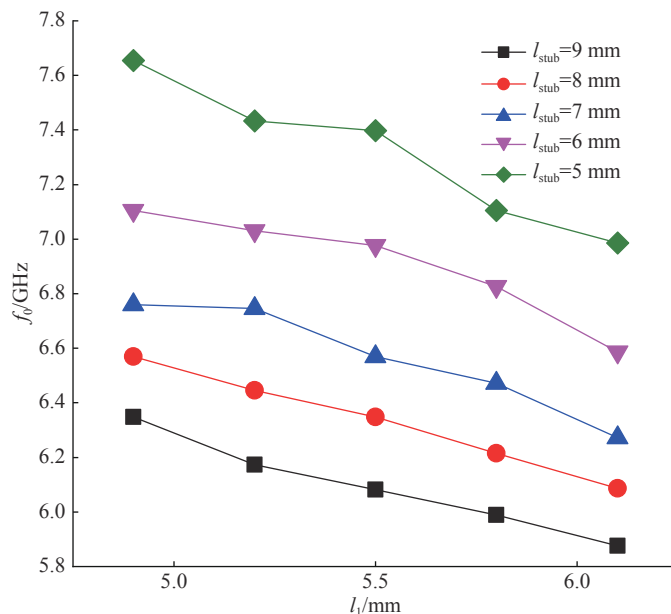

 Fig. 2 f_0 versus l_1 under different values of l_{stub}

 图 2 不同 l_{stub} 的 f_0 随 l_1 变化情况

从图 2 可看出, 微带线及枝节长度的改变会引起谐振频率的变化, 从而可通过改变微带线长度 l_1 及枝节长度 l_{stub} 大小来实现滤波器中心频率的移动并且保持绝对带宽的恒定。

本文提出三个变容二极管加载的 SLR, 其等效电路如图 3(a) 所示。由于结构的对称性, 可采用奇偶模法分析其特性。当进行奇模或偶模激励时, 图 3(a) 结构的中心对称面(黑色虚线)可分别看作虚拟电壁、虚拟磁壁, 所得到的等效单端口网络电路如图 3(b) 和图 3(c) 所示。

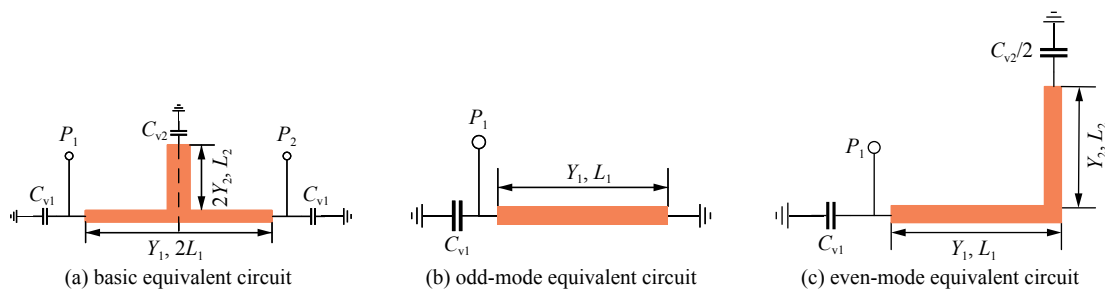


Fig. 3 Equivalent circuits of resonator loaded with three varactor diodes

图 3 变容二极管加载谐振器等效电路图

奇模激励时, 其等效电路中 P_1 位置的端口导纳为

$$Y_{\text{in,odd}} = j\omega C_{v1} - jY_1 \cot \theta_1 \quad (1)$$

式中: θ_1 表示这段微带线的电长度, 对应于 L_1 的长度及角频率 ω , 由谐振器的奇模谐振条件

$$Y_{\text{in,odd}} = 0 \quad (2)$$

可得

$$C_{v1} = \frac{Y_1 \cot \theta_{1,o}}{\omega_o} \quad (3)$$

$$\theta_{1,o} = \frac{\omega_o L_1}{c} \quad (4)$$

式中: $\theta_{1,o}$ 表示奇模角频率 ω_o 的电长度; c 表示自由空间中的电磁波传播速度。从式(3)可看出奇模谐振频率可通过改变 C_{v1} 容值得以调节。

同理, 进行偶模激励时, 其等效电路中 P_1 位置的端口导纳为

$$Y_{in,even} = j\omega C_{v1} + Y_1 \frac{jY_1 \tan \theta_1 + Y_{in1}}{jY_{in1} \tan \theta_1 + Y_1} \quad (5)$$

$$Y_{in1} = jY_2 \frac{Y_2 \tan \theta_2 + \omega \frac{C_{v2}}{2}}{-\omega \frac{C_{v2}}{2} \tan \theta_2 + Y_2} \quad (6)$$

式中: θ_2 表示对应于长度 L_2 及角频率 ω 的电长度, 由谐振器的偶模谐振条件

$$Y_{in,even} = 0 \quad (7)$$

可得

$$C_{v2} = 2 \frac{Y_2^2 \tan \theta_{2,e} + jY_{in1,e} Y_2}{j\omega_e Y_{in1,e} \tan \theta_{2,e} - \omega_e Y_2} \quad (8)$$

$$Y_{in1,e} = jY_1 \frac{Y_1 \tan \theta_{1,e} + \omega_e C_{v1}}{\omega_e C_{v1} \tan \theta_{1,e} - Y_1} \quad (9)$$

式中: $\theta_{1,e}, \theta_{2,e}$ 分别表示对应偶模角频率为 ω_e 、长度为 L_1, L_2 的电长度。从式(8), (9)可看出, 偶模谐振频率可通过改变电容 C_{v1}, C_{v2} 得以调节。

频率可调过程可归纳为以下步骤:

①根据中心频率调节范围的设计目标, 先选择一个合适范围的变容二极管 C_{v1} , 通过调节 C_{v1} 使得通带或者阻带中心频率位于频率可调范围内;

②根据带宽指标, 再选择另外一个变容管 C_{v2} , 调节 C_{v2} 使得通带或阻带的带宽在整个中心频率调节范围内保持恒定不变。在谐振器与输入输出传输线间选择合适的间距来获得需要的外部耦合。

1.2 耦合拓扑分析

所设计滤波器的耦合拓扑如图4所示。当PIN二极管零偏时, 等效为一个恒定电容, 阻断电流, 呈现“关闭”状态, 此时为带通滤波器; 当正偏时, 等效为一个小电阻, 允许电流通过, 呈现“导通”状态, 切换为带阻滤波器。同时, 在输入输出馈线结构中引入了源与负载耦合, 加上滤波器双模特性, 所以通带两侧各有一个传输零点。通带下侧零点是源与负载耦合产生的, 上侧的零点是两个主传输路径相互抵消产生的。传输零点的出现, 提升了滤波器选择性和抑制能力。

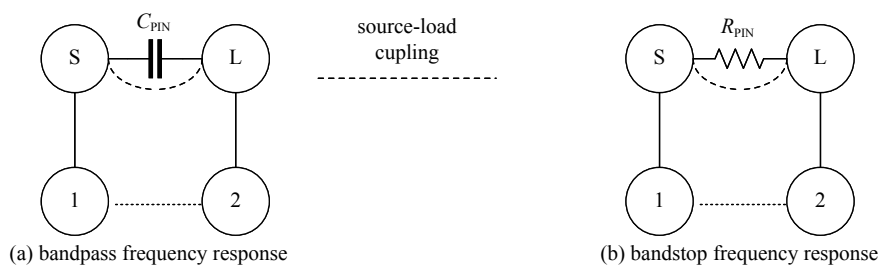


Fig. 4 Schematic of coupling topology

图4 耦合拓扑图

2 仿真及测试结果

由以上分析, 设计了一款频率调节范围分别为 5.42~5.79 GHz, 5.58~5.89 GHz, 绝对带宽分别为 120, 80 MHz 的高选择性可调带通与带阻可切换滤波器, 如图5所示。最终得到的滤波器结构参数如下: $l=13$ mm, $l_1=1.5$ mm, $l_{01}=2$ mm, $l_{02}=3.7$ mm, $l_{03}=1.2$ mm, $l_2=8$ mm, $l_m=1.9$ mm, $l_w=2.5$ mm, $l_{sm}=0.8$ mm, $l_{sm1}=1.2$ mm, $l_{sm2}=1.4$ mm, $l_{stub}=0.6$ mm, $W_0=2.4$ mm, $W_{01}=5.5$ mm, $W_{stub}=1$ mm。本文设计的滤波器采用了介电常数 $\epsilon_r=2.2$, 厚度 $h=0.7874$ mm 的 Rogers 5880(tm) 基板。变容管 C_{v1} 采用 MACOM MA46H120, 变容管 C_{v2} 采用 TOSHIBA JDV2S71E, PIN 二极管采用 SMP 1345-

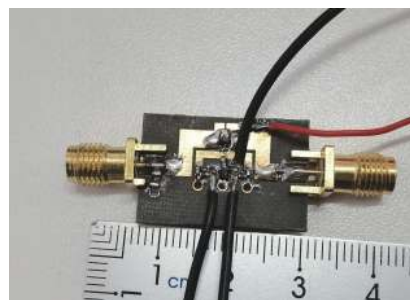
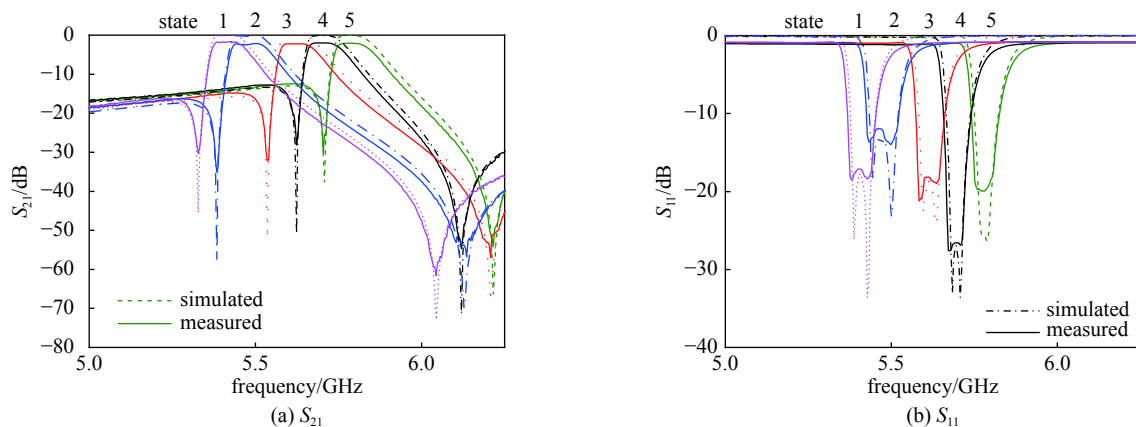


Fig. 5 Photograph of the fabricated tunable filter

图5 可调滤波器实物图

079LF。在本设计中,采用的仿真工具是 ANSYS Electronics 15.0,测试设备是德科技矢量网络分析仪 N5244A。

图 6 为可调带通滤波器的仿真及测试结果图,此时 PIN 二极管零偏。该滤波器在 5.42~5.79 GHz 的频率范围内能够实现连续可调,且绝对带宽在 120 MHz±5 MHz 范围内变化,变化幅度非常小,此图给出了可调过程的 5 个状态。此外可以看到,在带通滤波器中心频率调节的过程中,由于源与负载耦合始终存在,所以传输零点一直存在,且相对于通带的位置几乎不变。说明了该滤波器在整个可调范围内均保持着高选择性和良好的带外抑制性能,上阻带的带外衰减可达 50 dB。测量出的带内回波损耗在整个频率调节范围内优于 13 dB,插入损耗为 1.69~2.25 dB。表 1 为 5 个调节状态的性能参数及相应的控制电压。



Note: short dot, state 1; dash dot, state 2; dot, state 3; short dash dot, state 4; short dash, state 5.

Fig. 6 Simulated and measured results of the fabricated tunable filter with bandpass frequency response

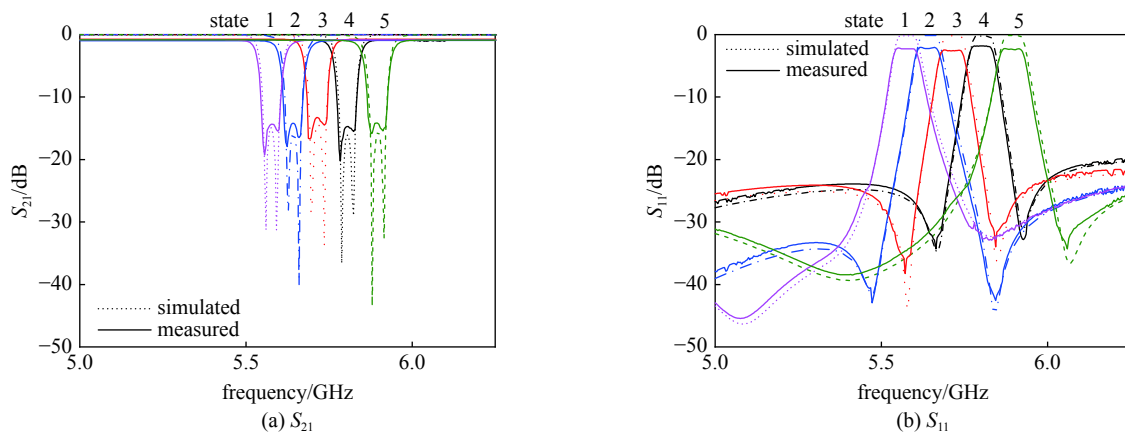
图 6 可调带通滤波器仿真及实物测试结果

表 1 列出的带通滤波器 5 个状态的性能参数及控制电压值

Table 1 Performance parameters and control voltage values of 5 states of bandpass filter (BPF)

state	f_0/GHz	BW/MHz	V_1/V	V_2/V	V_3/V
1	5.42	115.4	6.34	9.83	0
2	5.49	117.5	6.65	10.05	0
3	5.56	120.9	7.12	10.34	0
4	5.71	117.4	7.37	10.56	0
5	5.79	120.1	7.51	10.79	0

图 7 为可调带阻滤波器的仿真及测试结果图,此时 PIN 二极管正偏。该滤波器在 5.58~5.89 GHz 的频率范围内能够实现连续可调,且绝对带宽在 80 MHz±5 MHz 范围内变化,变化幅度非常小,此图给出了可调过程的 5 个状态。此外可以看到,在带阻滤波器中心频率调节的过程中,两侧传输零点一直存在,且相对于阻带的位置几乎不



Note: short dot, state 1; dash dot, state 2; dot, state 3; short dash dot, state 4; short dash, state 5.

Fig. 7 Simulated and measured results of the fabricated tunable filter with bandstop frequency response

图 7 可调带阻滤波器仿真及实物测试结果

变。说明了该滤波器在整个可调范围内均保持着高选择性能。测量出的阻带内回波损耗在上通带优于 21 dB, 下通带优于 25 dB, 阻带内衰减优于 14 dB, 测得的下通带插入损耗低于 0.4 dB, 上通带插入损耗低于 0.9 dB。表 2 为 5 个调节状态的性能参数及相应的控制电压。表 3 总结了本文所设计的可调带通-带阻可切换滤波器与之前发表文献的相关参数对比。可以看出, 本文所设计的可调滤波器通带与阻带选择性及带外抑制性较好, 而且尺寸也很小。

表 2 列出的带阻滤波器 5 个状态的性能参数及控制电压值

Table 2 Performance parameters and control voltage values of 5 states of bandstop filter (BSF)

state	f_0/GHz	BW/MHz	V_1/V	V_2/V	V_3/V
1	5.58	85.3	6.65	10.58	0.89
2	5.64	76.2	6.95	10.95	0.89
3	5.71	77.6	7.12	11.13	0.89
4	5.80	76.1	7.37	11.69	0.89
5	5.89	78.5	7.51	11.94	0.89

表 3 与之前的微带可调带通-带阻可切换滤波器的性能对比

Table 3 Performance comparison of the present design with previous reported tunable microstrip BPFs and BSFs

design	frequency tuning/GHz (bandpass/bandstop)	$\text{BW}_{3\text{dB}}/\text{MHz}$ or $\text{FBW}/\%$ (bandpass/bandstop)	insertion loss/dB (bandpass)	return loss/dB (bandpass)	rejection level (bandstop)	circuit size/ λ_g^2
of Ref.[15]	0.68~0.985/0.725~0.995	N/A	2.2~5.9	>13	>20	N/A
of Ref.[16]	1.9~2.3	2.5~3/3~7	3.3~6.5	>10	>15	0.188
of Ref. [17]	2.9~3.6	45~230	N/A	N/A	>20	>0.333
of this paper	5.42~5.79/5.58~5.89	(120±5)/(80±5)	1.69~2.25	>13	>14	0.178

3 结 论

本文采用了加载三个变容二极管和一个 PIN 二极管的 SLR, 设计了一款高选择性的可调带通与带阻可切换滤波器。等效电路模型使用奇偶模理论分析, 通过选择合适的参数, 可以实现在中心频率调节过程中保持绝对带宽不变的特性。通过引入源与负载耦合产生传输零点, 使得带内选择性及带外抑制能力得以提升。同时, 该滤波器频率范围位于 C 波段, 带阻滤波器可以实现超宽带滤波器对干扰信号的良好抑制作用。该滤波器具有高选择性、简单的电路结构和紧凑的尺寸, 在可调和多用途射频系统中具有重要的潜力。

参考文献:

- [1] Chen Chifeng, Wang Guoyun, Li Honghen, et al. Microstrip switchable and fully tunable bandpass filter with continuous frequency tuning range[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2018, 28(6): 500-502.
- [2] Karpuz C, Gorur A K, Emur M, et al. Quad-band microstrip bandstop filter design using dual-mode open loop resonators having thin film capacitors[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, 26(11): 873-875.
- [3] Feng Wenjie, Hong Meiling, Che Wenquan, et al. Dual-band microstrip bandstop filter with multiple transmission poles using coupled lines[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, 27(3): 236-238.
- [4] Xiang Qianyin, Feng Quanyuan, Huang Xiaoguo, et al. Electrical tunable microstrip LC bandpass filters with constant bandwidth[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, 61(3): 1124-1130.
- [5] Tsai H Y, Huang Tingyi, Wu R B. Varactor-tuned compact dual-mode tunable filter with constant passband characteristics[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2016, 6(9): 1399-1407.
- [6] Feng Wenjie, Shang Yuxia, Che Wenquan, et al. Multifunctional reconfigurable filter using transversal signal-interaction concepts[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, 27(11): 980-982.
- [7] Wong P W, Hunter I. Electronically tunable filters[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2009, 10(6): 46-54.
- [8] Hunter I C, Rhodes J D. Electronically tunable microwave bandpass filters[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1982, 30(9): 1354-1360.
- [9] Kim B W, Yun S W. Varactor-tuned combline bandpass filter using step-impedance microstrip lines[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2004, 52(4): 1279-1283.
- [10] 王显, 张德伟, 刘庆, 等. 一种高选择性的可调 0.83~2.15 GHz 带通滤波器[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 113001. (Wang Xian, Zhang Dewei, Liu Qing, et al. A tunable 0.83-2.15 GHz bandpass filter with high selectivity[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 113001)

- [11] Ebrahimi A, Baum T, Scott J, et al. Continuously tunable dual-mode bandstop filter[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2018, 28(5): 419-421.
- [12] Li Qun, Chen Xiong, Yang Tao, et al. Tunable bandstop filter with high suppression and wide tuning range[J]. *Electronics Letters*, 2019, 55(16): 910-912.
- [13] Chan K Y, Ramer R. Waveguide switchable bandstop and bandpass filters using RF MEMS switches[C]//Proceedings of 2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. 2019: 19-22.
- [14] Fan Maoyu, Song Kaijun, Zhu Yu, et al. Compact bandpass-to-bandstop reconfigurable filter with wide tuning range[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2019, 29(3): 198-200.
- [15] 李润铄. 新型平面可调带通-带阻滤波器的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019: 43-50. (Li Runshuo. Research on novel planar tunable bandpass-to-bandstop filter[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019: 43-50.)
- [16] Yang Tao, Rebeiz G M. Bandpass-to-bandstop reconfigurable tunable filters with frequency and bandwidth controls[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(7): 2288-2297.
- [17] Psychogiou D, Gómez-García R, Peroulis D. Fully-reconfigurable bandpass/bandstop filters and their coupling-matrix representation[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, 26(1): 22-24.