

双频带切换可调谐带通滤波器的设计与实现

王友保,李燎原,郑大鹏

(南京信息工程大学 电子与信息工程学院,南京 210044)

摘要:为了改善频谱资源短缺的现状,设计了一款结构简单、双频带切换的可调谐带通滤波器(Bandpass Filter,BPF).该 BPF 由 2 个 $\lambda/4$ 的阶跃阻抗谐振器(Step Impedance Resonator,SIR)加载变容二极管构成,而每个 SIR 的组成又有 2 部分,通过一个开关二极管连接起来.利用开关二极管在通断状态下表现出来的不同特性,实现了在高、低 2 个频带内的谐振频率切换;通过调整变容二极管的偏置电压,实现谐振频率的调谐.基于仿真模型加工制作了滤波器实物,测试结果显示,在开关二极管导通时,可在 1.76~1.98 GHz 之间调谐,插入损耗 3.59~4.12 dB;断开时,可在 2.26~2.52 GHz 之间调谐,插入损耗 3.22~4.15 dB,测试与仿真结果基本一致.该款滤波器可有效缓解频谱资源问题,具有较强的实际应用价值.

关键词:双频带;可调谐滤波器;带通滤波器;变容二极管

中图分类号:TN713

文献标志码:A

滤波器作为通信系统的重要器件,对通信质量的优劣有着十分巨大的影响.对于多个工作频带的无线通信系统,传统的滤波器组不仅所占的空间比较大,不适应当下设备小型化的趋势,而且会增加电路的复杂度和制作成本.可调滤波器的出现能够很好解决这些问题,在传统的滤波器中添加可调器件,能够在保证滤波器具有较小尺寸的同时,提供多个工作频带,这对于实现无线通信设备的小型化和集成化都有着很大的益处.而带通滤波器在滤波器的设计中占据着十分重要的地位,因此,设计出一款尺寸小、多频带、宽调谐范围的 BPF 尤为重要.到目前为止,科研人员已经提出了多种可调谐的 BPFs,并使用不同的设计方法进行了研究.文献[1-2]采用双模开环谐振器设计了可调谐 BPF.由于双模开环谐振器的奇偶模之间不存在耦合,使得频率调谐变得简单;文献[3]设计了一个具有 2 个独立可控传输零点的可调谐 BPF;文献[4-5]设计了频率、带宽和传输零点可调的梳状 BPF;文献[6]设计了一款二阶全可调梳状 BPF,采用 T 型带宽控制网络可以灵活地控制谐振器之间的耦合.

本文基于短路 $\lambda/4$ 的 SIR,通过添加变容二极管和开关二极管,设计了一款双频带切换可调谐 BPF.由于设计的拓扑结构存在源、负载、谐振器 3 者之间的电磁耦合使信号的相位发生偏移,在输出端产生了相位差,进而在通带的 2 侧各产生一个传输零点,提高了 BPF 的带外抑制能力,同时能够保持较小的尺寸,这对于可调谐 BPF 的小型化设计有着很大的益处.

1 阶跃阻抗谐振器的分析

阶跃阻抗谐振器(SIR)由日本学者 MAKIMOTO 和 YAMASHITA 首次提出^[7].它由均匀阻抗谐振器(Uniform Impedance Resonator,UIR)演变而来,通过不同特征阻抗的传输线连接而成.SIR 在结构上比 UIR 多了一个的变量,在确定谐振频率时可以更加自由的设计模型,并且使用 SIR 不仅可以减小滤波器的尺寸,而且能改善带外抑制能力.

SIR 加载电容的基本结构如图 1 所示,定义传输线的特征导纳和等效电长度分别由 Y 和 θ 代表.由于加

收稿日期:2019-07-11;修回日期:2019-11-29.

基金项目:国家自然科学基金(61673222)

作者简介(通信作者):王友保(1964—),男,安徽合肥人,南京信息工程大学副教授,博士,研究方向为微波器件与电路,计算电磁学,E-mail:001923@nuist.edu.cn.

载电容的 SIR 的结构相对于平面 p 是对称的,符合奇偶模分析法理论的使用条件,因此可用该理论分析其谐振特性.奇模激励时,对称面 p 可视为短路,其等效模型如图 2 所示;偶模激励时,对称面 p 可视为开路,其等效模型如图 3 所示^[8].

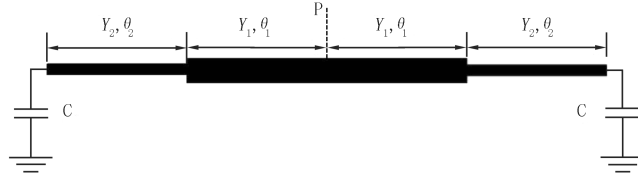


图 1 阶跃阻抗谐振器加载电容

Fig.1 Loading capacitance of step impedance resonator

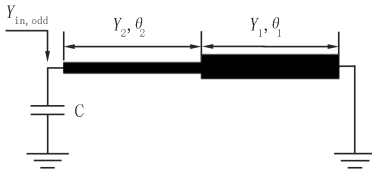


图 2 奇模等效结构

Fig.2 Odd-mode equivalent structure

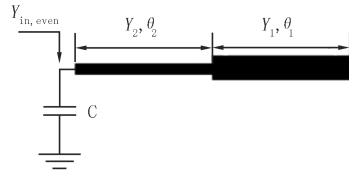


图 3 偶模等效结构

Fig.3 Even-mode equivalent structure

根据传输线理论,输入导纳可以表示为

$$Y_{in,odd} = jY_2 \frac{Y_2 \tan \theta_2 \tan \theta_1 - Y_1}{Y_2 \tan \theta_1 + Y_1 \tan \theta_2} + j\omega C, (\text{奇模}); Y_{in,even} = jY_2 \frac{Y_1 \tan \theta_1 + Y_2 \tan \theta_2}{Y_2 - Y_1 \tan \theta_1 \tan \theta_2} + j\omega C, (\text{偶模}),$$

其中, $\theta_i = \beta l_i = \frac{2\pi f_0 \sqrt{\epsilon_{re}}}{c} l_i$, ϵ_{re} 是有效介电常数, β 是传播常数, l_i 是物理长度, f_0 是中心频率, c 是自由空间的光速.

在谐振条件下, $Y_{in,odd} = Y_{in,even} = 0$, 则有

$$f_{odd} = \frac{R_Y - \tan \theta_1 \tan \theta_2}{2\pi C (\tan \theta_1 + R_Y \tan \theta_2)}, (\text{奇模}), f_{even} = \frac{R_Y \tan \theta_1 + \tan \theta_2}{2\pi C (R_Y \tan \theta_1 \tan \theta_2 - 1)}, (\text{偶模}),$$

其中, $R_Y = \frac{Y_1}{Y_2}$.

由上述公式可知,当谐振器中添加电容时,其奇偶模的谐振频率不仅与传输线有关,而且与电容 C 也有关系.所以,当电容 C 变化时,奇偶模的谐振频率也会随着变化,实现调谐的目的.

2 可调谐滤波器的设计

本文设计的双频带切换可调谐 BPF 的物理模型如图 4 所示.该 BPF 由谐振器、输入输出微带馈线、4 个变容二极管和 2 个开关二极管组成.谐振器结构左右对称,由 2 个共用接地点的 $\lambda/4$ 阶跃阻抗传输线实现的,每个阶跃阻抗传输线由 2 部分传输线通过一个开关二极管连接组成,并将其结构进行有效弯折,使得 BPF 的尺寸进一步减小.在源和负载之间引入交叉耦合,耦合强度由 S 和 L_2 控制.通过调节开关二极管的通断,BPF 的谐振频率可在高频和低频间切换.在谐振器与输入输出端之间插入变容二极管 C_1 ,在开关二极管处添加一对变容二极管 C_2 ,同时调整 C_1, C_2 的值,实现 BPF 在 2 个频带下中心频率的调谐.变容二极管 C_i (即 C_1 或 C_2) 由集总电容 C_{ai} (隔断直流) 和变容二极管 C_{bi} 串联实现,其中 RFC 是指由一个电阻实现的射频扼流圈.

为了更好地揭示所设计的可调 BPF 的原理,给出了它的拓扑结构,如图 5 所示.其中, S 和 L 分别表示输入和输出端; 1 和 2 分别表示靠近源一侧的 SIR 和靠近负载一侧的 SIR; I, II 分别表示低频带和 高频带; 实线和虚线分别表示直接和交叉耦合路径; M_{12} 表示谐振器奇模、偶模之间的磁耦合; M_{S1}, M_{SL}, M_{L2} 分别表示

源与谐振器、源与负载、负载与谐振器之间的电耦合.从图 5 中可知,在输入端和输出端之间形成了 2 条传输路径: $S-L$; $S-1-2-L$.信号从输入端通过这 2 个路径传输到输出端时,信号的相位发生了偏移,在通带的 2 侧产生了 180° 的相位差,生成了 2 个传输零点.

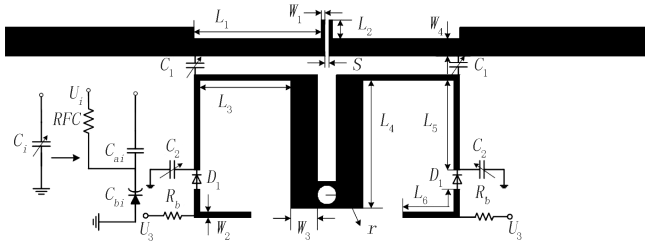


图 4 滤波器的物理结构

Fig.4 Physical structure of the filter

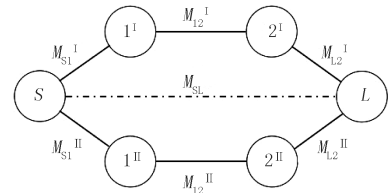


图 5 滤波器的拓扑结构

Fig.5 Topological structure of the filter

根据 BPF 中存在的 2 个工作频带,以下给出了开关二极管在导通和断开时所产生的不同工作频带的物理结构.当导通时, L_6 成为谐振器的一部分,BPF 在低频带发生谐振,其物理结构如图 6(a)所示;断开时,BPF 切换到高频带,此时 BPF 的物理结构如图 6(b)所示.通过添加开关二极管实现 BPF 在低频、高频 2 个频带的切换,同时保持较小的尺寸.



图 6 滤波器双频带的等效结构

Fig.6 Equivalent structure of dual-band filter

所设计的 BPF 的传输零点的位置由源负载之间的耦合强度确定,而耦合强度由参量 L_2 和 S 确定,所以,传输零点的位置随着 L_2 和 S 的变化而变化.图 7 和图 8 分别给出了 L_2, S 对传输零点位置影响的仿真图.当 L_2 增大或者 S 减小时,传输零点更加靠近通带边缘,使得 BPF 的通带边缘衰减更加陡峭,但阻带抑制能力会降低.最终,经过对带外衰减陡峭度和抑制能力的权衡,选择 $L_2=1 \text{ mm}, S=0.2 \text{ mm}$.

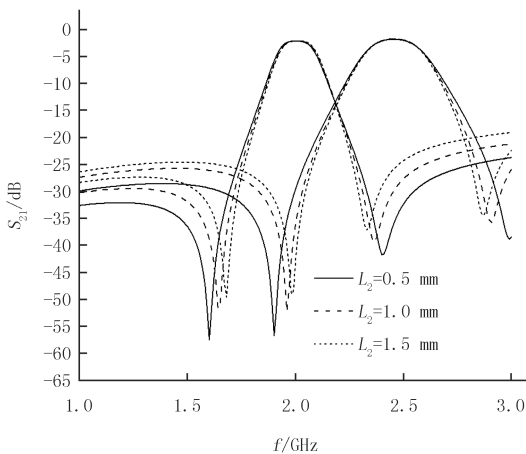


图 7 L_2 对滤波器传输零点的影响

Fig.7 Effect of L_2 on transmission zeros of filter

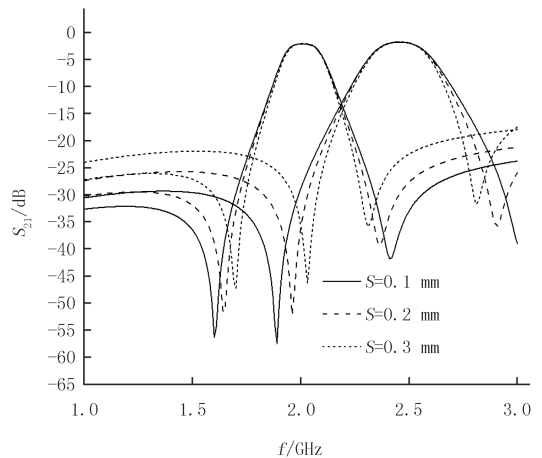


图 8 S 对滤波器传输零点的影响

Fig.8 Effect of S on transmission zeros of filter

3 实验结果与讨论

所设计的 BPF 是在厚度为 0.8 mm 的 FR4(介电常数为 4.4, 损耗正切 0.002) 介质板上, 通过高频电磁仿真软件(HFSS)进行大量优化得到, 其尺寸如表 1 所示. 最后, 将仿真模型加工制作成实物, 如图 9 所示, 其中, 模型中的短路点由一个金属通孔实现.

表 1 滤波器的参数

Tab.1 Parameters of the filter											mm	
W_1	W_2	W_3	W_4	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	S	r	
0.2	0.3	1.4	0.9	6.7	1	4.8	7	5	4.2	0.2	0.5	

另外, 在 BPF 实物中采用的变容二极管是 Skyworks 公司的 SMV2201, 用于调谐通带频率. 当偏置电压采用 20 V 和 0 V 时, 变容二极管容值分别为 0.23 pF 和 2.1 pF. 同时, 还使用了 Skyworks 公司的 2 个开关二极管(SMP-1302)元件. 当正向偏置电压为 1 V 时, 可视为一个小电阻, 处于导通状态; 当处于零偏压时, 呈现出很大的阻抗, 可视为断开状态. 在进行仿真设计时, 考虑到实际元器件是非理想元器件, 所以, 利用贴片电阻来代替开关二极管, 并设置贴片电阻为 1 Ω 来模拟开关二极管导通时实际的工作状态.

使用安捷伦 N5227A 网络分析仪对上述 BPF 实物进行了测试, 并将低频带和低频带的仿真和测试结果分别由图 10 和图 11 给出. 图 10 所示为 U_3 取 1 V(即开关二极管导通)时的仿真与测试结果. 当 (U_1, U_2) 分别取 (4.8 V, 0.9 V), (6.6 V, 2.7 V)、(9 V, 20 V) 时, 其中心频率分别为 1.76 GHz, 1.88 GHz, 1.98 GHz. 可见 BPF 在低频带上的调谐范围为 1.76~1.98 GHz, 相应的插入损耗从 3.59 dB 变化到 4.12 dB, 回波损耗在 10 dB 以下. 图 11 所示为 U_3 取 0 V(即开关二极管断开)时的仿真与测试结果. 当 (U_1, U_2) 分别取 (6.6 V, 6.6 V), (8.1 V, 8.1 V), (16 V, 16 V) 时, 其中心频率分别为 2.26 GHz, 2.38 GHz, 2.52 GHz. 可见 BPF 在高频带上的调谐范围为 2.26~2.52 GHz, 相应的插入损耗从 3.22 dB 变化到 4.15 dB, 回波损耗在 10 dB 以下. 从测试结果中可以看出, 当 U_3 分别取 0 V 和 1 V 时, 谐振器可在高频、低频之间切换, 同时保持较好的带外抑制, 且中心频率随着 U_1, U_2 的增大而增大.

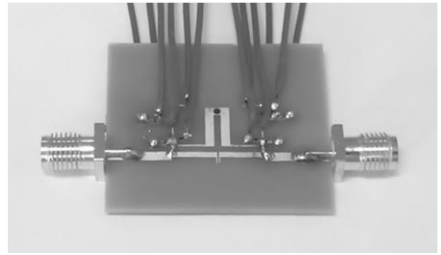


图 9 滤波器实物图

Fig.9 Physical diagram of filter

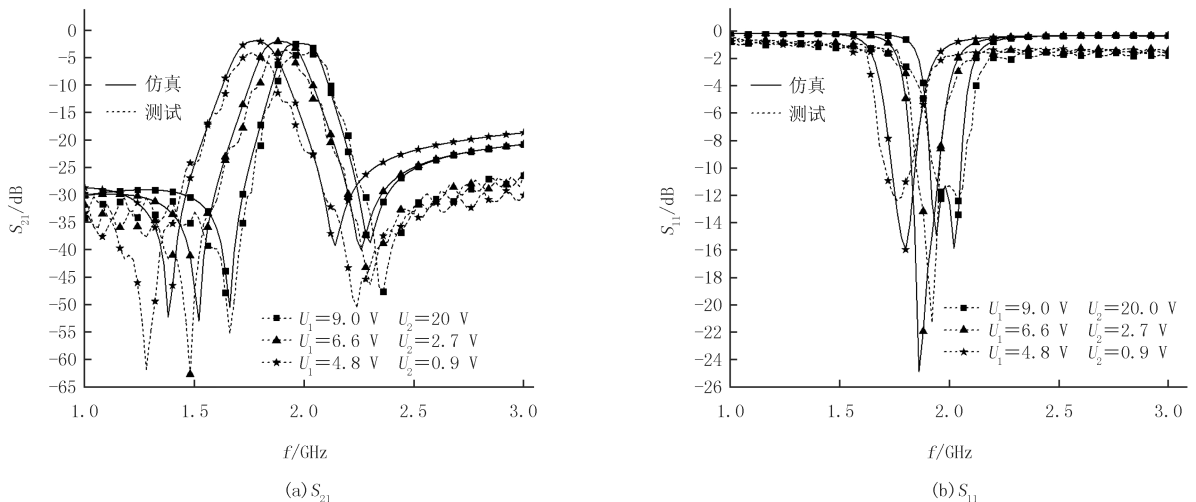


图 10 滤波器低频带的仿真和测试结果

Fig.10 The simulation and measure results of the low frequency band of the filter

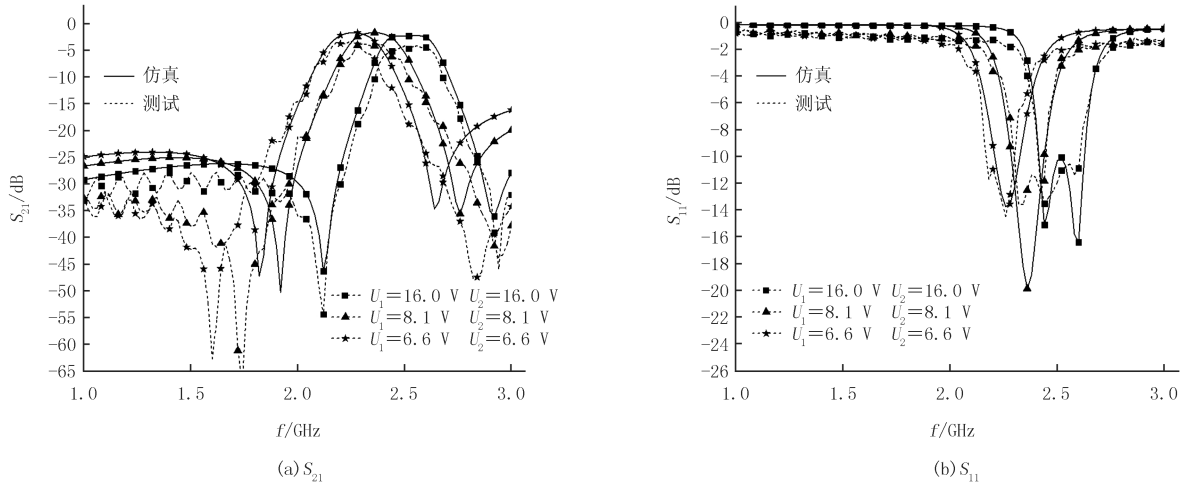


图 11 滤波器高频带的仿真和测试结果

Fig.11 The simulation and measure results of the high frequency band of the filter

测试和仿真结果基本一致,但在中心频率调谐范围、插损等方面仍有一定偏差,这是由于制作的实物存在误差、非理想的测试环境以及加载元器件的有限精度造成的.因此,为减小上述误差,在制作该滤波器实物时,可采用更高精度的元器件和更加精细的制作工艺;另外,在测试该滤波器时,可在用吸波材料搭建的隔离外部电磁干扰的相对密闭环境中进行测试,减小因测量而引起的误差.

为了更加清晰的说明本设计的性能,给出了该滤波器与现有的可调 BPF 的比较,如表 2 所示.从表 2 中可看出,所设计的可调 BPF 结构更简单便于制作,尺寸更小,频率调谐范围更宽.

表 2 与现有的可调谐 BPFs 比较

Tab.2 Comparisons with existing tunable BPFs

文献	调谐元件	调谐频带/GHz	插入损耗/dB	回波损耗/dB	宽/mm	长/mm	是否可调
[9]	变容二极管	0.72~0.80	0.55	>10	86.8	100.4	是
		0.90~1.05	0.85~1.00	>20			
[10]	变容二极管	1.08~1.19	2.80~3.80	>10	22.0	18.7	是
		2.07~2.22	1.80~2.70	>17			
[11]	变容二极管	1.30~1.45	2.40~2.90	-	25.0	40.0	是
[12]	变容二极管	2.70~2.90	<1.50	>20	20.0	30.0	是
		5.01	0.81	>15			
[13]	-	8.25	0.81	>10	13.0	13.2	否
[14]	-	1.82	0.92	>20	28.0	30.5	否
		2.93		>30			
本文	变容二极管+	1.76~1.98	3.59~4.12	>10	14.0	10.4	是
	开关二极管	2.26~2.52	3.22~4.15	>10			

4 结 论

本文采用 $\lambda/4$ 短路 SIR 设计了一款双频带切换可调谐 BPF.利用开关二极管和变容二极管实现了谐振频率在 2 个频带之间的切换和调谐,同时具有较好的带外抑制能力.该 BPF 中心频率能够在 1.76~1.98 GHz,2.26~2.52 GHz 之间调谐,其插入损耗分别为 3.59~4.12 dB,3.22~4.15 dB.滤波器的整体尺寸仅为 14 mm×10.4 mm×0.8 mm.这款滤波器具有双频带切换、电路简单、调谐范围大,体积小等优势,在实际应用中具有较大的应用价值.

参 考 文 献

[1] CHUN Y H,HONG J S.Electronically reconfigurable dual-mode microstrip open-loop resonator filter[J].IEEE microwave and wireless

- components letters,2008,18(7):449-451.
- [2] TANG W,HONG J S.Varactor-tuned dual-mode bandpass filters[J].IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2010,58(8):2213-2219.
- [3] LONG J,LI C,CUI W,et al.A tunable microstrip bandpass filter with two independently adjustable transmission zeros[J].IEEE Microwave and Wireless Components Letters,2011,21(2):74-76.
- [4] CHIOU Y C,REBEIZ G M.A tunable three-pole 1.5-2.2 GHz bandpass filter with bandwidth and transmission zero control[J].IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2011,59(11):2872-2878.
- [5] CHIOU Y C,REBEIZ G M.Tunable 1.55-2.1 GHz 4-pole elliptic bandpass filter with bandwidth control and > 50 dB rejection for wireless systems[J].IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2013,61(1):117-124.
- [6] CHI P L,YANG T, TSAI T Y.A fully tunable two-pole bandpass filter[J].IEEE Microwave and Wireless Components Letters,2015,25(5):292-294.
- [7] MAKIMOTO.无线通信中的微波谐振器与滤波器[M].北京:国防工业出版社,2002.
- MAKIMOTO.Microwave resonator and filter in wireless communication[M].Beijing:National Defense Industry Press,2002.
- [8] HONG J S,LANCASTER M J.Microstrip Filters for RF /Microwave Applications[M].New York:Wiley,2001.
- [9] GOMEZ-GARCIA R,GUYETTE A C.Reconfigurable Multi-Band Microwave Filters[J].IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2015,63(4):1294-1307.
- [10] 蔡伟伟,梁飞,吕文中,等.基于双模谐振器的双通带可调谐滤波器设计[J].微波学报,2018,34(1):65-69.
- CAI W W,LIANG F,LYU W Z,et al.Design of Tunable Dualband Bandpass Filter Based on Dual-Mode Resonator[J].Journal of microwave science,2018,34(1):65-69.
- [11] 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.
- SU J,ZHANG Y R,CHENG C H,et al.Design of a Switchable Absolute Constant Bandwidth Tunable Bandpass Filter[J].Journal of microwave science,2017,33(6):45-47.
- [12] 秦绪嵘,和新阳.一款新型微带双模可调滤波器设计[J].电子设计工程,2016,24(7):101-103.
- QIN X R,HE X Y.Design of a novel microstrip dual-mode tunable filter[J].Electronic design engineering,2016,24(7):101-103.
- [13] WANG S X,ZHOU D,ZHANG D,et al.Dual-band bandpass filter using loop resonator with independently-tunable passband[J].Electronics Letters,2017,53(25):1655-1657.
- [14] LEU W,ZHANG D,LYU D,et al.Dual-band microstrip bandpass filter with independently-tunable passbands using patch resonator[J].Electronics Letters,2018,54(10):665-667.

Design and implementation of dual-band switching tunable bandpass filter

Wang Youbao, Li Liaoyuan, Zheng Dapeng

(College of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to improve the shortage of spectrum resources, a tunable bandpass filter (BPF) with simple structure and dual-band switching is designed. The BPF is composed of two $\lambda/4$ step impedance resonators (SIRs) loaded with varactor diodes, each of which has two parts connected by a switching diode. So the switching of resonant frequency in high and low frequency band is realized by using different characteristics of switching diode in on and off state. In addition, the tuning of resonant frequency is realized by adjusting the bias voltage of varactor diode. At last, the filter is fabricated according to the simulation model. And the measured results show that when the switching diode is turned on, it can be tuned between 1.76-1.98 GHz with insertion loss of 3.59-4.12 dB; when disconnected, it can be tuned between 2.26-2.52 GHz with insertion loss of 3.22-4.15 dB. The results of measuring and simulating are basically consistent. So the filter is highly competitive in practical applications for mitigating spectrum resource problems.

Keywords: dual band; tunable filter; bandpass filter; varactor diode

[责任编辑 杨浦 王凤产]