

基于奇偶模分析法的四模谐振器结构的 双通带带通滤波器设计

张德伟,王树兴,刘 庆,周东方,张 毅,吕大龙,吴 瑛

(解放军信息工程大学信息工程学院,河南郑州 450002)

摘 要: 提出了一款基于四模谐振器的新型双通带带通滤波器. 设计的四模谐振器基于微带线结构,由四个开路枝节和一个短路枝节组成. 两次采用奇偶模分析法对该四模谐振器结构进行分析. 该四模谐振器的每个模式能够实现独立调节,同时每两个模式形成一个通带. 采用源与负载耦合的馈电方式,提高滤波器的带外抑制性. 该滤波器具有四个传输零点和四个传输极点. 测试结果表明,该双模双通带滤波器工作于 2.08GHz 和 6.07GHz,3dB 带宽分别为 11.06% 和 7.74%. 设计的滤波器具有紧凑的结构,只有 $0.28\lambda_g \times 0.11\lambda_g$ 大小.

关键词: 带通滤波器; 双通带; 四模谐振器; 奇偶模分析法; 高选择性

中图分类号: TN715 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)02-0387-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.02.018

The Design of Dual-Band Bandpass Filter Using Novel Quadruple-Mode Resonator Based on Odd-and Even-Mode Method

ZHANG De-wei, WANG Shu-xing, LIU Qing, ZHOU Dong-fang, ZHANG Yi, LÜ Da-long, WU Ying

(Institute of Information System Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: A new-type dual-band bandpass filter using a novel quadruple-mode resonator is proposed. This quadruple-mode resonator consists of four open-stubs and one short-stub. The odd-and even-mode method is adopted twice to analyze this resonator and good conclusions are given. Each resonant mode of the quadruple-mode resonator can be tuned independently. Each two modes form a passband of the filter. Source-load coupling is introduced to improve out-band rejection. To testify the proposed theory and resonator structure, a high-selectivity dual-band bandpass filter is designed and fabricated. The measured results show that it has four transmission zeros and four transmission poles. This filter is centered at 2.08/6.07GHz with 3dB bandwidths 11.06%/7.74% respectively and it has a compact size, only $0.28\lambda_g \times 0.11\lambda_g$.

Key words: bandpass filter; dual-band; quadruple-mode resonator; odd-and even-mode method; high-selectivity

1 引言

现代无线通信的发展趋势是多标准、多模式、超宽带、小型化. 微波滤波器作为无线通信系统的关键部件,在抑制干扰信号、寄生信号、噪声等方面起着重要的作用. 现代无线通信系统,尤其是单模块多业务的通信系统,给微波滤波器提出了高选择性、多通带以及小型化等方面的要求,成为近年来业内的研究热点. 随着现代工艺技术的发展,微波器件的小型化、集成化、单片化已成为现实^[1]. 尺寸小、选择性好的高性能双通带带通滤波器在现代通信系统中得到了广泛应用,许多文献资

料对双通带滤波器进行了深入研究,提出了大量的设计方法和器件结构. 目前对于双通带带通滤波器的研究思路主要分为五类:第一,采用多个单模谐振器组合结构^[1-3]. 此类结构一般利用非简并模式,但是具有较大的尺寸;第二,采用集总元件和微波谐振枝节(器)的混合结构^[4]. 此类滤波器为有源电路,其具有更好的滤波性能,但是拓扑一般较为复杂,成本较高;第三,采用单个或者两个(多个)双模谐振器结构^[5-7],此种结构的工作模式一般分为两类:简并模和非简并模式;双模双通带结构的带通滤波器具有结构简单、体积小、易于独立调节的优点;第四,不同谐振器的混合结构^[8],此

类滤波器兼顾了多种谐振器的优势,一般为嵌套结构,体积小,带外抑制度高;五,采用多模谐振器结构;主要包括开路-短路线谐振器^[9-11]和环形谐振器^[12]、贴片谐振器^[14]和阶跃阻抗谐振器等^[16],此种滤波器一般通过两对或者多对简并模实现.与其他类型相比,多模谐振器具有更小的尺寸,模式之间的互耦会引入传输零点,提高滤波器的选择性;第五,采用平衡式结构等^[17].此种滤波器带外抑制度高,抗环境噪声强,动态范围大,信噪比高,在多频带滤波器的应用中更具有优势^[18],已经得到广泛应用.

近年来,基于四模谐振器结构的双通带带通滤波器以其高选择性和更小的结构尺寸得到快速发展.文献[3]采用阶跃阻抗线设计了一款四模谐振器,但是结构较为复杂,理论分析繁琐,并且通带选择性较差.文献[9]提出的四模谐振器由两个环形开路枝节和一个短路线构成.其采用槽缝来增加耦合强度.文献[14]提出的四模谐振器基于微带贴片谐振器和折叠线的混合结构,拓扑复杂,测试结果表明其具有较大的损耗.目前,已经有相关研究指出,基于环形谐振器^[12]、贴片谐振器^[14]等结构的双通带带通滤波器的双通带之间的隔离度(带外抑制性)较差,并且第二个通带的上阻带具有凹陷效应.此外,谐振器的模式难以通过缝隙、容性耦合、C-section 等经典方式进行微扰分离.以上的不足限制了其更广泛的应用.

本文提出了一款拓扑简单的四模谐振器结构,采用缝隙和负载开路枝节尺寸对外部品质因数和耦合强度进行控制.四个模式可以独立调节,调节自由度高.每两个模式构成一个通带,形成了双通带带通滤波器的设计.该滤波器具有良好的性能,测试结果与仿真结果吻合度高,验证了提出的理论分析方法的正确性.

2 四模谐振器的模式分析

本文提出的四模谐振器的基本拓扑如图 1 所示.从图 1 中可以看出,该结构具有很好的对称性,因此可以采用奇偶模分析法对其特性进行研究.为分析方便,图 1 中的谐振器结构,具有以下性质:

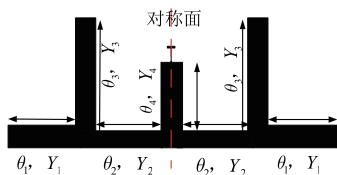


图1 四模谐振器的基本结构

(1) 微带线弯曲枝节在拐角处的场效应忽略不计,即与等长度的直线型微带枝节等效;

(2) 各微带枝节的特性阻抗(导纳)相等.即, $Y_1 =$

$$Y_2 = Y_3 = Y_4 = Y_0.$$

(3) 同时,为了更好的满足四模谐振器结构的对称性,有 $\theta_1 = \theta_3$;

利用奇偶模分析法对图 1 所示的结构进行分析,得其偶模电路和奇模电路如图 2(a)和图 2(b)所示.此时结构的对称性不直观,分析困难.对这两个电路分别逆时针旋转 90 度,可以得到图 2(c)、(d)所示的对称结构,其实,这两对结构本质上相同.各个电路的对称面已经标定.

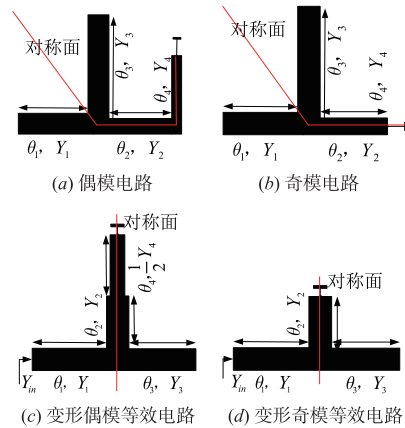


图2 四模谐振器的奇偶模等效电路(第一次奇偶模分析)

从图 2(c)和图 2(d)可以发现,第一次奇偶模分析后的等效电路仍然具有很好的对称性.因此对于图 2(c)和图 2(d)的等效电路,再次利用奇偶模分析法进行分析,得到的等效电路如图 3 所示.

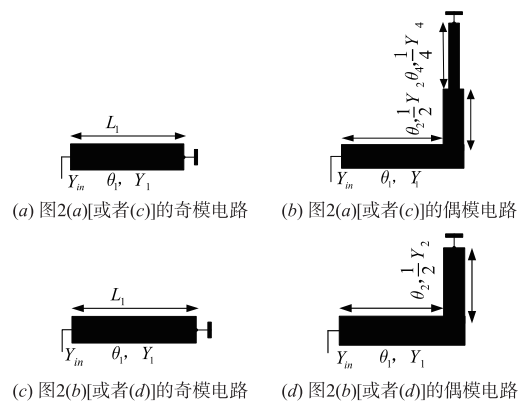


图3 四模谐振器的奇偶模等效电路(第二次奇偶模分析)

计算图 3(a)奇模电路的等效导纳 Y_{in1} ,为:

$$Y_{in1} = -jY_0 \cot\theta_1 \quad (1)$$

计算图 3(b)偶模电路的等效导纳 Y_{in2} ,为:

$$Y_{in2} = Y_0 \frac{j(2\tan\theta_4 \tan\theta_2 - 1) + j(4\tan\theta_4 + 2\tan\theta_2) \tan\theta_1}{2(2\tan\theta_4 + \tan\theta_2) + \tan\theta_1(1 - 2\tan\theta_4 \tan\theta_2)} \quad (2)$$

计算图 3(c)奇模电路的等效导纳 Y_{in3} ,为:

$$Y_{in3} = -jY_0 \cot\theta_1 \quad (3)$$

计算图 3(d) 偶模电路的等效导纳 Y_{in4} , 为:

$$Y_{in4} = Y_0 \frac{j(2\tan\theta_1 \tan\theta_2 - 1)}{2\tan\theta_2 + \tan\theta_1} \quad (4)$$

当图 3 的各个电路处于谐振状态时, 其相应的输入导纳为零. 令 f_{e1} , f_{e2} , f_{o1} 和 f_{o2} 分别为图 3(a)、(b)、(c) 和 (d) 的谐振频率. 显然, 这四个谐振频率具有如下的大小关系:

$$f_{e1} = f_{o1} < f_{o2} < f_{e2} \quad (5)$$

同时, 基于式(1)~(5)进行分析, 可以得到如下结论:

- (1) f_{e1} 和 f_{o1} 由电长度 θ_1 决定;
- (2) f_{e1} 和 f_{o1} 一起构成了滤波器一个通带(高频端);
- (3) 电长度 θ_1 和 θ_2 决定 f_{o2} ; 电长度 θ_1 , θ_2 和 θ_4 决定 f_{e2} ;
- (4) 通过调节电长度 θ_4 ($\theta_4 \approx 0 \pm n/2\lambda_g$), f_{e2} 能够向高频段移动, 靠近 f_{o2} . 由此 f_{o2} 和 f_{e2} 构成了滤波器的第二个通带(低频端);
- (5) 由(3)、(4)可知, 每个通带有两个传输极点;
- (6) 设计滤波器时, 首先要调节由 f_{e1} 和 f_{o1} 决定的带宽, 然后再调节由 f_{e2} 和 f_{o2} 决定的带宽.

由于后期的结构优化, 以及馈电结构的引入, 谐振器的结构拓扑发生如下变化:

- (1) 微带枝节 θ_4 蚀刻了槽缝, 主要用于调节源与负载的耦合, 引入传输零点.
- (2) 由于后期的结构优化, 微带枝节 θ_1 和 θ_3 的长度不再严格相同.
- (3) 为了小型化设计和更好地调节通带耦合系数, 对微带枝节 θ_3 进行了弯曲, 这样枝节 θ_4 和 θ_3 之间的耦合距离可以调节通带的耦合系数.
- (4) 由于结构的优化, 各微带枝节的特性阻抗(导纳)不再严格相等. 即, $Y_1 \neq Y_2 \neq Y_3 \neq Y_4$, 最终结构如图 4 所示.

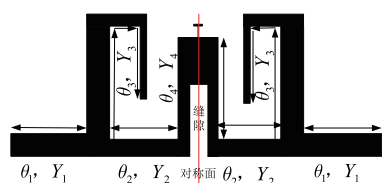


图4 提出的变形四模谐振器结构及滤波器

此时, 对于图 4 所示的结构利用奇偶模法进行分析, 得到的电路如图 5 所示.

从图 5 可以看出, 此结构仍具有准对称性, 实际上是可以再次利用奇偶模分析法进行讨论. 也可以从输入导纳的角度进行分析, 在谐振点处, 输入导纳为零, 可以求得各个模式频率. 但是计算发现, 其各自的输入导纳表达式太过复杂, 在此给定的条件下, 求解困难. 分析

可以发现, 由于地的存在, 该结构仍具有四个工作模式. 在一定的假设下, 基于图 2(a)、(b) 和基于图 5(a)、(b) 分析得到的结果基本一致.

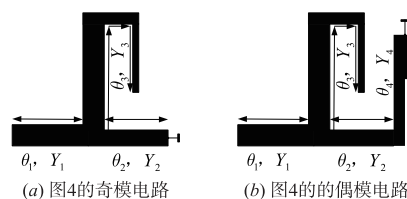
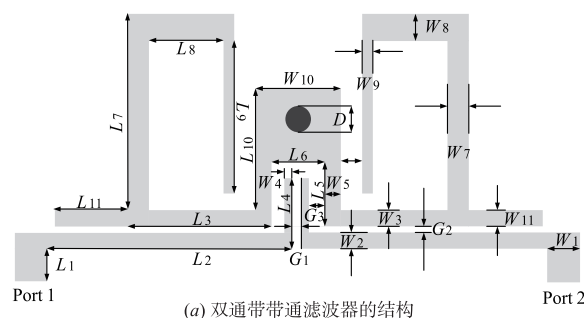


图5 奇偶模电路

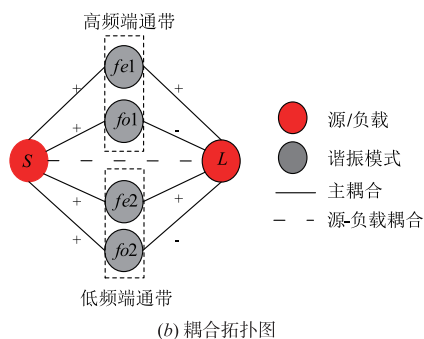
综上所述, 本文主要对图 1 的基本结构进行分析, 得到的结论具有普遍意义. 在此结构基础上, 可以变形得到系列拓扑, 本文提出图 4 的结构只是其中一种. 但是基于奇偶模分析得到的结论却普遍适用于基于图 1 演变得到的所有结构.

3 双通带带通滤波器的分析与设计

基于以上分析, 本文设计的双通带滤波器的结构如图 6 所示. L-型的微带耦合线用于得到源与负载耦合, 引入额外的传输零点, 同时对四模谐振器进行耦合激励.



(a) 双通带带通滤波器的结构



(b) 耦合拓扑图

图6 双通带带通滤波器的结构及耦合拓扑图

设计的两个通带的外部品质因数 Q_{e1} 和 Q_{e2} 分别为:

$$Q_{e1} = \frac{\pi[f_{e1}\tau_{S11}(f_{e1}) + f_{o1}\tau_{S11}(f_{o1})]}{2} \quad (6a)$$

$$Q_{e2} = \frac{\pi[f_{e2}\tau_{S11}(f_{e2}) + f_{o2}\tau_{S11}(f_{o2})]}{2} \quad (6b)$$

每个通带的耦合系数 k_1 和 k_2 分别为:

$$k_1 = \frac{f_{e1}^2 - f_{o1}^2}{f_{e1}^2 + f_{o1}^2} \quad (7a)$$

$$k_2 = \frac{f_{e2}^2 - f_{o2}^2}{f_{e2}^2 + f_{o2}^2} \quad (7b)$$

其绝对值来确定耦合程度,绝对值大则耦合紧,反之耦合松;符号确定耦合性质,负号为电容耦合,正号为电感耦合.两个谐振频率离得远,则为紧耦合,反之为松耦合.可见,紧耦合具有 Q_0 值低、带宽宽的特点,松耦合具有 Q_0 值高、带宽窄的特点.

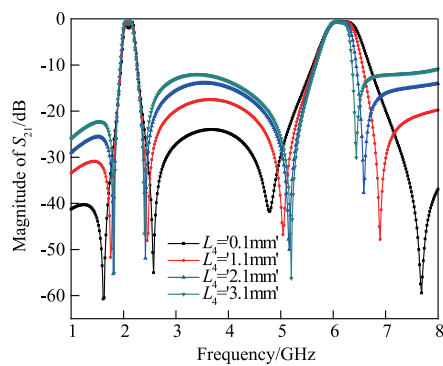
本滤波器利用开路枝节 L_4 调节带外抑制度和带内选择性.滤波器传输响应 $|S_{21}|$ 随开路枝节 L_4 的长度变化曲线如图 7(a) 所示.可以看出,当 L_4 从 0.1 mm 增加到 3.1 mm 时,带外抑制度分别从 -40 dB 恶化到 -21 dB, -25 dB 恶化到 -12 dB,双通带间的隔离度从 -40 dB 变为 -11 dB.同时从图中可以看出,随着 L_4 逐渐增加,高频端通带的带内选择性逐渐变差而低频端通带的带内选择性和带宽保持不变,而高频端的通带带宽随着 L_4 的增大而逐渐减小.并且,高频通带的上下边带的传输零点位置也发生了相应的变化.因此,可以利用开路枝节 L_4 对高频端的通带进行调节.

从图 7(b) 可以看出,第一个通带的耦合系数 k_1 随

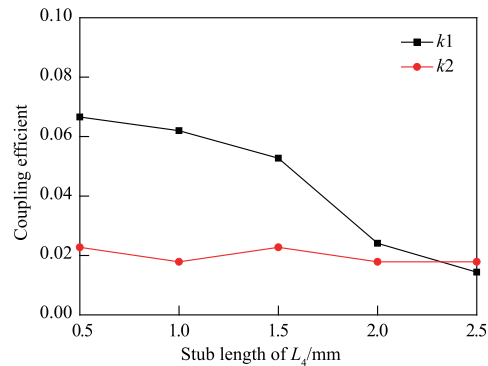
着增加枝节 L_4 长度增加而减小,两者是负相关的关系,而第二个通带的耦合系数 k_2 保持不变;

短路枝节 L_{10} 由一个金属过孔实现.该金属过孔连接金属地.由式(1)~式(4)可知,理论上,短路枝节 L_{10} 仅能调节第一个通带.但是由于结构的对称性遭到破坏,使得 L_{10} 同时影响两个通带.传输响应 $|S_{21}|$ 随 L_{10} 的变化曲线如图 8(a) 所示.可以看出,随着 L_{10} 的增加,两个通带的带宽逐渐增加.并且两个通带下边带的传输零点均随着枝节 L_{10} 的增加而向低频段移动,上边带传输零点位置不变.

从图 8(b) 中可以看出,第一个通带的耦合系数 k_1 随着增加枝节 L_{10} 长度增加而增加,两者是正相关的关系.但是第二个通带的耦合系数 k_2 保持不变,与参数 L_{10} 无关,由此实现第二个通带的耦合系数 k_2 的独立调节.如图 9(a) 所示,随着馈线之间的距离 G_1 逐渐增加,高频端通带的带内选择性变差,但是带外抑制度和通带之间的隔离度逐渐改善.从图 9(b) 中可以看出,随着耦合距离 G_1 逐渐增大,第一个通带(低频端)的外部品质因数 Q_{e1} 逐渐增大,而第二个通带(高频端)的外部品质因数 Q_{e2} 略微有减小的趋势,几乎不受耦合距离的影响,由此实现两个通带的外部品质因数的独立调节.

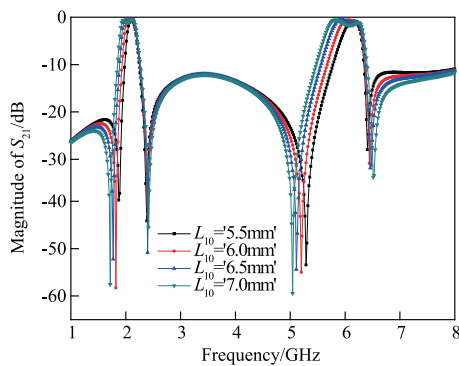


(a) S_{21} 随 L_4 的变化曲线

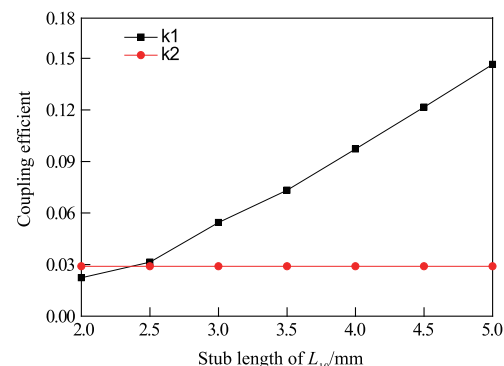


(b) 两个通带的耦合系数随 L_4 的变化曲线

图7 开路枝节 L_4 对滤波器的调节

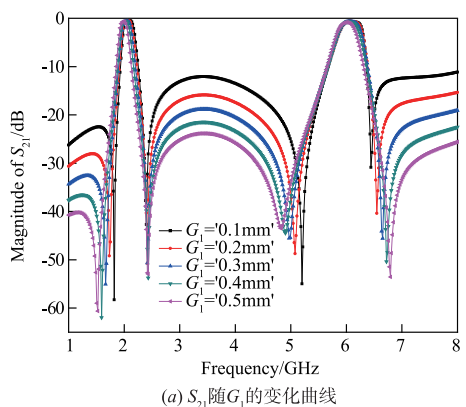
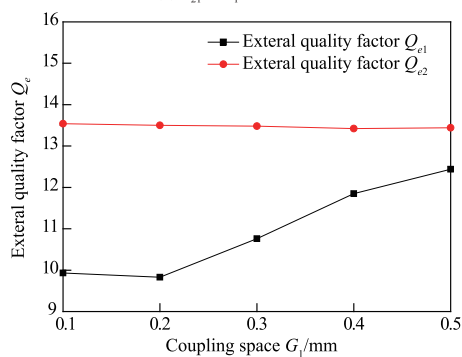


(a) S_{21} 随 L_{10} 的变化曲线



(b) 两个通带的耦合系数随 L_{10} 的变化曲线

图8 短路枝节 L_{10} 对滤波器的调节

(a) S_{21} 随 G_1 的变化曲线(b) 两个通带的外部品质因数 Q_{e1} 和 Q_{e2} 随 G_1 的变化曲线图9 G_1 对滤波器的调节

4 双通带带通滤波器的测量

为了验证滤波器的性能,本文加工了基于提出的四模谐振器结构的双通带带通滤波器,并进行了测试.该滤波器采用的基片集成波导的厚度为1.5mm,介电常数为 $\epsilon_r = 3.55$.

双通带带通滤波器的尺寸如下: $L_1 = 2\text{mm}$, $L_2 = 12.1\text{mm}$, $L_3 = 5.5\text{mm}$, $L_4 = 2.8\text{mm}$, $L_5 = 3\text{mm}$, $L_6 = 1.2\text{mm}$, $L_7 = 6\text{mm}$, $L_8 = 4.4\text{mm}$, $L_9 = 5.6\text{mm}$, $L_{10} = 5.5\text{mm}$, $G_1 = 0.2\text{mm}$, $G_2 = 0.2\text{mm}$, $G_3 = 0.1\text{mm}$, $W_1 = 2\text{mm}$, $W_4 = 0.3\text{mm}$, $W_5 = 0.7\text{mm}$, $W_8 = 0.8\text{mm}$, $W_9 = 0.2\text{mm}$, $W_{10} = 2.6\text{mm}$, $D = 0.8\text{mm}$.图10给出了其测试曲线.可以看出滤波器工作于2.08GHz和6.07GHz,3dB带宽分别为11.06%和7.74%.四个传输零点分别为1.75GHz,2.48GHz,5.17GHz和6.55GHz.通带内的最大插损分别为1.52dB和1.63dB,带外抑制制度优于15dB.本文采用Agilent N5244A网络分析仪进行测量.滤波器的尺寸为 $0.28\lambda_g \times 0.11\lambda_g$,其中 λ_g 是2.08GHz处的波导波长.

为了验证该滤波器的性能,表1给出了目前最新参考文献中提出的滤波器的部分指标,并与本文设计的滤波器指标进行对比.从表1中可以看出,该滤波器的插损较小,带宽较大,同时其带内反射系数较好,显

示出该滤波器整体良好的性能.

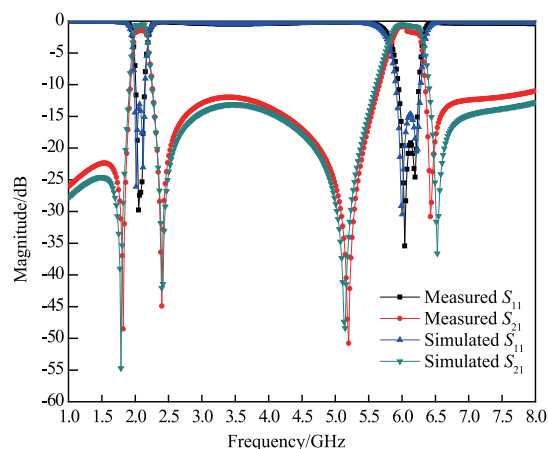


图10 滤波器测试曲线

表1 滤波器指标对比

参考文献	频率 (GHz)	3dB 相对带宽	插损 (dB)	反射 (dB)	传输零点个数
[4]	1.1/1.79	6.9%/5.59%	1.6/3.4	10.1/14.4	4
[5]	2.45/5.70	6.53%/4.2%	0.8/1.2	20.8/20	4
[10]	2.4/5.2	5.8%/6.45%	3.6/3.1	15/22	3
[13]	2.41/3.51	10.8%/6.4%	1.5/1.7	20/20	5
[17]	9.23/14.05	2.8%/5.6%	2.9/2.7	18/12	4
本文	2.08/6.07	11.1%/7.7%	1.5/1.6	14.5/15	4

5 结论

本文设计了一款新型的四模谐振器结构.两次运用奇偶模分析法对该结构进行分析.该谐振器的四个模式独立可调,每两个模式构成了一个传输通带,易于设计双通带带通滤波器.提出的滤波器具有较小的结构尺寸,适合滤波器的小型化设计.各通带的耦合系数和外部品质因数独立可调.该滤波器具有四个传输零点,紧靠两个通带,提高了滤波器的选择性和过渡带的陡峭程度.

此外,可以通过增加输入输出双馈线之间的耦合距离、采用耦合线与缺陷地结构(DGS)相结合、引入交叉耦合和混合耦合产生新的传输零点的方法来提高两通带间的隔离度.

参考文献

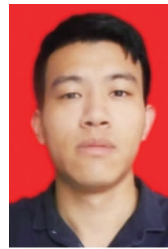
- [1] 王树兴,周东方,张德伟,吕大龙.半模基片集成波导增益均衡器的设计和实现[J].电子学报,2016,44(12):2868-2876.
WANG Shu-xing, ZHOU Dong-fang, ZHANG De-wei, Lü Da-long. The design and realization of half mode substructure integrated waveguide gain equalizer[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(12): 2868-2876. (in Chinese)
- [2] Wu G C, Wang G, Liang J G, et al. Miniaturized microstrip

- dual-band bandpass filter using novel symmetric double-spiral resonators for WLAN application [J]. Electronics Letters, 2015, 51(15): 1177 – 1178.
- [3] Zhang S, Zhu L. Fully canonical dual-band bandpass filter with $\lambda/4$ stepped impedance resonators [J]. Electronics Letters, 2014, 50(3): 192 – 194.
- [4] Zhi-Han Chen, Qing-Xin Chu. Dual-band reconfigurable bandpass filter with independently controlled passbands and constant absolute bandwidths [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016, 26(2): 92 – 94.
- [5] Guo-cheng Wu, Guangming Wang, Jiang Gang Liang, Xiang-jun Gao, Li Zhu. Miniaturised microstrip dual-band bandpass filter using novel symmetric double-spiral resonators for WLAN application [J]. Electronics Letters, 2015, 51(15): 1177 – 1178.
- [6] Peng Y, Zhang L, Fu J, et al. Compact Dual-band bandpass filter using coupled lines multimode resonator [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(4): 1 – 3.
- [7] F Chen, K Song, B Hu, Yong Fan. Compact dual-band bandpass filter using HMSIW resonator and slot perturbation [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014, 24(10): 686 – 688.
- [8] Duan Q, Song K, Chen F, et al. Compact dual-band bandpass filter using simply hybrid structures [J]. Electronics Letters, 2015, 51(16): 1265 – 1266.
- [9] Xu J, Wu W, Miao C. Compact and sharp skirts microstrip dual-mode dual-band bandpass filter using a single quadruple-mode resonator (QMR) [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(3): 1104 – 1113.
- [10] Shanshan Xu, Kaixue Ma, Fanyi Meng, and Kiat Seng Yeo. Novel defected ground structure and two-side loading scheme for miniaturized dual-Band SIW bandpass filter designs [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 254: 217 – 219.
- [11] Fan J, Zhan D, Jin C, et al. Wideband microstrip bandpass filter based on quadruple mode ring resonator [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2012, 22(22): 348 – 350.
- [12] Sun S. A dual-band bandpass filter using a single dual-mode ring resonator [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2011, 21(6): 298 – 300.
- [13] Ming-Chun Tang, Ting Shi, Shiyong Chen, Hailin Cao. Dual-band bandpass filter based on a single triple-mode ring resonator [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016, 52(9): 722 – 724.
- [14] Zhang R, Zhu L, Luo S. Dual-mode dual-band bandpass filter using a single slotted circular patch resonator [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2012, 22(5): 233 – 235.
- [15] 周春霞, 夏侯海, 季鲁, 何明, 方兰, 阎少林. 双模方形带通滤波器的分析、建模及设计 [J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1364 – 1367.
ZHOU Chun-xia, XIAHOU Hai, JI Lu, HE Ming, FANG Lan, YAN Shao-lin. Analysis, modeling and design of quadrate dual-mode bandpass filters [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(6): 1364 – 1367. (in Chinese)
- [16] Chin K S, Yeh J H. Dual-wideband bandpass filter using short-circuited stepped-impedance resonators [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2009, 19(3): 155 – 157.
- [17] Yijin Shen, Hui Wang, Wei Kang, and Wen Wu. Dual-band SIW differential bandpass filter with improved common-mode suppression [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(2): 100 – 102.
- [18] Li Yang, Wai-Wa Choi, Kam-Weng Tam and Lei Zhu. Balanced dual-band bandpass filter with multiple transmission zeros using doubly short-ended resonator coupled line [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63(7): 1 – 8.

作者简介



张德伟 男, 1973 年出生, 吉林九台人, 2005 年获博士学位, 硕导, 教授, 主要研究方向为电磁场微波技术、微波无源器件和有源器件、微波测量等。



王树兴 (通信作者) 男, 1990 年 9 月出生, 山东临沂人. 2016 年获得解放军信息工程大学工学硕士学位, 现为信息工程大学博士研究生. 主要研究方向为微波毫米波电路理论技术及微波无源器件的设计.
E-mail: wangshuxing000@126.com