

基于微带贴片谐振器的高选择性双模 双通带带通滤波器的研究

王树兴, 吴 瑛, 周东方, 张德伟, 张 毅

(解放军信息工程大学信息工程学院, 河南郑州 450002)

摘 要: 本文提出了基于微带贴片谐振器的高选择性双模双通带带通滤波器及一种模式分析算法. 首次利用该算法分析了微带贴片的模式组成, 计算了导模场的闭式解. 微带贴片的耦合馈线同时作为谐振单元构成第二个通带, 减小了结构尺寸. 全波仿真分析(full wave analysis)结果及测试数据表明, 与现有的双模双通带带通滤波器相比, 本文设计的滤波器传输零点个数增加了2倍, 达到11个, 带外抑制度达到20dB, 带内插损较小, 仅为1.2dB, 抑制了寄生通带. 同时设计的拓扑结构复杂度较低, 利于滤波器的小型化.

关键词: 双通带; 双模; 带通滤波器; 微带贴片谐振器; 高选择性; 高带外抑制性

中图分类号: TN715 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)03-0595-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.03.012

Study of High-Selectivity Dual-Mode Dual-Band Bandpass Filters Based on Microstrip Patch Resonator

WANG Shu-xing, WU Ying, ZHOU Dong-fang, ZHANG De-wei, ZHANG Yi

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

Abstract: High-selectivity dual-mode dual-band bandpass filters using microstrip patch resonator and the method of mode analysis are proposed. The closed form solutions of the guided mode field of the microstrip patch resonator and mode constitution are given. The microstrip patch resonator is fed by microstrip quasi-rectangular rings which also work in two degenerate modes, providing the second passband. Compared with the existing dual band bandpass filters, the full wave analysis and measured results show that the number of transmission zeros of the filters designed in this paper is increased by two times. The filter has eleven transmission zeros, suppressing the parasitic passband. The band rejection reaches about 20dB while the insertion loss is only 1.2dB. Furthermore, these structures are suitable for the miniaturization of filters.

Key words: dual-band; dual-mode; bandpass filter; microstrip patch resonator; high-selectivity; high-rejection

1 引言

随着现代无线通信系统的快速发展, 现在的单模块处理多业务的通信系统, 例如全球移动通信系统(Global System for Mobility, GSM)、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)和无线城域网/全球微波互连接入(Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX), 对于体积小、低损耗、高带内选择性和高带外抑制性的双通带带通滤波器^[1](Dual-Band Bandpass Filter, DB-BPF)的需求越来越大, 成为滤波器的一个重要

的研究方向^[1,2].

目前, 大量 DB-BPF 结构被提出. DB-BPF 主要分为两大类: 第一, 多个单模谐振器组成的 DB-BPF; 主要包括环线结构(spiral resonators)^[3]、基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)结构^[4-6]、阶跃阻抗谐振器(Stepped Impedance Resonators, SIR)结构^[7]以及不同单模谐振器的组合结构^[8-10]; 第二, 多模谐振器结构的 DB-BPF; 主要包括双模谐振器结构的 DB-BPF 和三模、四模等多模谐振器结构的 DB-BPF^[1,2,10-12]. 其中, 双模双通带带通滤波器(Dual-Mode Dual-Band Bandpass Filter, DM-DB-BPF)以其结构简单、体积小、易于调节的

优点得到快速发展^[1,2,4,10]. DM-DB-BPF 的设计结构也分为两大类:第一,由两个或者多个双模谐振器结构组成的 DM-DB-BPF,主要包括方环谐振器结构(Square Loop Resonator, SLR)^[13,14]、开路或者短路枝节加载谐振器(Stub-Loaded Resonator, SLR)^[15]、光子带隙(Photonic Band Gap, PBG)^[16]等人造周期结构、E-型谐振器(E-Shaped Resonator, ESR)^[17]和 SIW 多模谐振器及其衍生结构^[1,4]. 给谐振器结构引入合适的微扰机制^[2,13,14],就可以实现谐振频率的调节. 在已有的双模谐振器结构中,利用的双模包括简并双模^[2]和非简并双模^[10]. 常用的微扰机制主要包括非谐振缝隙微扰^[18]、微带开路短路枝节微扰^[19]和切角微扰^[20]. 第二,由单个双模(多模)谐振器结构组成的 DM-DB-BPF. 常用的结构包括环谐振器(Ring Resonator, RR)^[21,22]、贴片谐振器(Patch Resonator, PR)^[23]、四模谐振器(Quadruple-Mode Resonator, QMR)^[2,12,24]和阶跃阻抗谐振器^[25]等. 其谐振频率的调节采用非谐振缝隙. 常用的非谐振缝隙结构包括平行缝隙^[18]、十字交叉缝隙^[19]和圆弧缝隙^[23]. 在双模(多模)谐振器结构中,贴片谐振器可以看成两个单模谐振器的合成. 这两个单模是一对简并模式,具有很好的正交性. 当选择合适的馈电结构,模式之间的互耦造成模式的分离,两个本征模式可以变成了四个模式,易于实现双通带. 微带贴片谐振器已经在滤波器的设计中得到广泛应用^[27-32].

本文提出了三款基于微带贴片谐振器结构工作于 WLAN(2.4GHz)和 WiMAX(3.5GHz)的 DM-DB-BPF. 设计的滤波器具有优异的矩形系数和较好的带外抑制性,测试结果与仿真结果匹配较好,验证了提出的结构和设计方法的正确性.

2 微带贴片谐振腔的导模场分析

本文采用的介质基板的介电常数为 3.5,基板的厚度为 1mm. 设微带谐振器长为 L_{RE} ,宽为 W_{RE} . 对于微带贴片结构,其横向场可以用纵向场表示. 纵向场 E_z 和 H_z 满足以下亥姆霍兹方程:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_c^2 \right) \begin{Bmatrix} E_{0z}(x, y) \\ H_{0z}(x, y) \end{Bmatrix} = 0 \quad (1)$$

对于 TE 模式,边界条件为:

$$\begin{cases} H_{0z}(x, y) \Big|_{x=0, a} = 0 \\ H_{0z}(x, y) \Big|_{y=0, b} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

联立以上两式,基于分离变量法,解得:

$$H_z(x, y, z) = H_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (3)$$

其中, $m+n > 1$. 对于其他场分量,可以由式(2)求得.

对于 TM 模式,边界条件为:

$$\begin{cases} H_x = \frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \Big|_{y=0, b} = 0 \\ H_y = \frac{-j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \Big|_{x=0, a} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

联立以上两式,解得

$$E_z(x, y, z) = E_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (5)$$

其中, $m+n > 0$. 对于其他场分量,同样可以由式(2)求得.

对于微带贴片谐振腔,其本质上是双导体结构,工作模式为 TEM 模,同时还会有高次的 TE 模式或者 TM 模式存在.

对于 TE_{n00} (TEM) 模式,计算得到其电场分量为:

$$E_y = \frac{-j \left(1 + \frac{1}{n-1} \right) \omega \mu W_{RE}}{\pi} H_{10} \cos \frac{n\pi z}{\left(1 + \frac{1}{n-1} \right) L_{RE}} \quad (6)$$

其谐振频率为:

$$f_{n00} = \frac{c_0}{2 \sqrt{\epsilon_r} \left(1 + \frac{1}{n-1} \right) W_{RE}} \quad (7)$$

其中, $n \geq 2$. 对于 TE_{m0p} 模式,计算得到其电场分量为:

$$E_y = \frac{-j \left(1 + \frac{1}{m-1} \right) \omega \mu W_{RE}}{\pi} H_{10} \sin \frac{m\pi z}{\left(1 + \frac{1}{m-1} \right) W_{RE}} \cdot \cos \frac{p\pi z}{\left(1 + \frac{1}{p-1} \right) L_{RE}} \quad (8)$$

其谐振频率为:

$$f_{m0p} = \frac{c_0}{2 \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{\left(\frac{m}{\left(1 + \frac{1}{m-1} \right) W_{RE}} \right)^2 + \left(\frac{p}{\left(1 + \frac{1}{p-1} \right) L_{RE}} \right)^2}} \quad (9)$$

其中, $m \geq 2, p \geq 2$. 该微带贴片谐振腔的前三个模式 TE_{002} 模式, TE_{200} 模式和 TE_{202} 模式的电场和表面电流如图 1 所示.

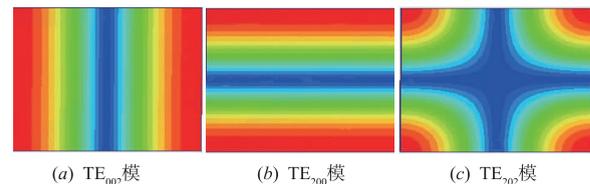


图1 主模和两个高次模的电场分布图

根据微带贴片的场分布可知, TE_{200} 模式和 TE_{002} 模式的场相互正交,因此通过引入微扰缝隙,可以实现这两个模式的独立调节.

3 基于微带贴片谐振腔的滤波器设计 I

本文设计的第一种双模双频带通滤波器的结构如图 2 所示. 该结构采用矩形环微带线对微带贴片谐振腔进行馈电, 激励起两个模式: TE_{200} 模式和 TE_{002} 模式, 其电场图 1(a)、(b) 所示. 同时, 这两个矩形环微带馈线和微带贴片的组合结构工作于 TEM 模式, 也会至少激励起两个谐振频率. 通过引入合理的微扰机制, 选择合理的结构尺寸, 则可以激励起四个模式, 其中微带贴片的两个模式对应的谐振频率构成高频端的通带, 组合结构产生的两个谐振频率构成低频端的通带, 由此形成双模双通带滤波器.

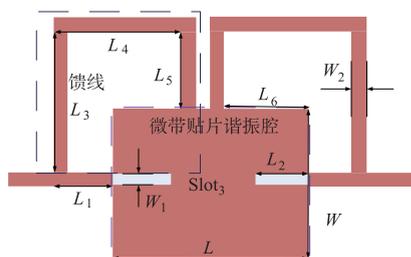


图2 第一种双模双频带通滤波器结构

该双频段带通滤波器的四个谐振频率 2.1GHz, 2.4GHz (形成第一个通带), 3.2GHz, 3.4GHz (形成第二个通带) 对应的电场分布及各个模式的近似谐振长度如图 3 所示. 前两个模式主要是由微带贴片产生 (如图 3(c)、(d) 所示). 第三个模式和第四个模式是由微带矩形环和微带贴片共同产生 (如图 3(a)、(b) 所示).

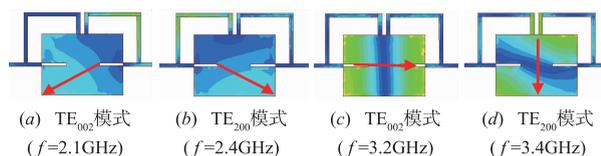


图3 四个谐振频率的电场分布及等效谐振长度
(箭头红线表示其谐振长度)

谐振长度和器件的谐振频率一一对应. 图 3 给出的谐振长度能够从直观上阐述四个谐振频率的来源. 对于复杂的结构, 确定其谐振长度非常困难, 应该从其最基本的结构原型作为切入点, 本文研究的系列结构的切入点就是简化为微带贴片谐振腔.

对于独立的微带谐振腔的等效长度, 本文的第二小节已经对于其理论进行了完整的推导, 可以发现, 其本质上就是一个二分之一谐振波长; 当引入馈电结构时, 其等效长度是变化的, 一部分的馈线也并入到谐振结构中去, 因此才会出现图 3 描述的谐振长度.

对于环形结构, 基于不同谐振腔的谐振原理, 定位到哪一种谐振情况, 然后基于表面电流分布情况, 由此

确定等效谐振长度.

本结构最大的特点是采用微带准矩形环对微带贴片谐振器进行馈电, 同时矩形环又作为谐振单元构成滤波通带.

表 1 第 I 种滤波器尺寸

参数	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
尺寸(mm)	4.0	6.4	13.2	13.7	5.0
参数	L_6	L	W	W_1	W_2
尺寸(mm)	10.0	23.5	17.6	1.1	1.1

第一种双模双频带通滤波器测试与全波仿真曲线如图 4 所示. 其 3dB 相对带宽为 18.2%/8.2%, 通带内插损优于 -2.5dB, 带内反射优于 -12dB, 带外抑制也优于 -15dB, 三个传输零点分别为 2.43GHz, 3.26GHz 和 4.05GHz. 结构尺寸如表 1 所示. 本文滤波器中的缝隙不是谐振缝隙. 它的主要作用是在特定模式的场分布位置, 引入微扰, 相当于引入电容, 使得谐振发生改变, 实现对不同模式的谐振频率进行独立调节, 实现对工作频率和带宽的控制.

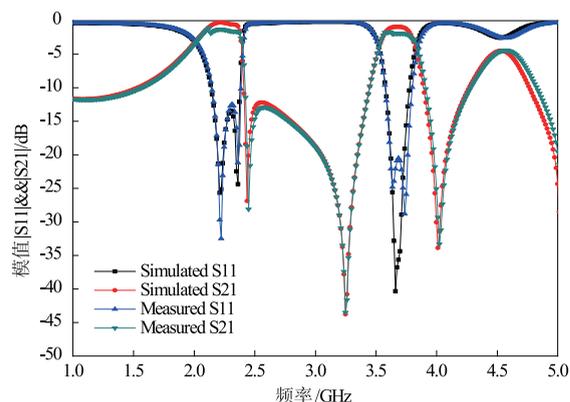


图4 第一种双模双频带通滤波器仿真与测试曲线

4 基于微带贴片谐振腔的滤波器设计 II

从图 4 的测试结果可以看出, 该滤波器在低频端的滤波性能较差, 选择性较弱. 此外, 在 4.6GHz 处的抑制性很差, 近似形成一个寄生通带, 降低了滤波器的性能.

为了实现更好的带外抑制性和带内选择性, 设计了新的馈电机理, 增加了源与负载耦合, 这是目前滤波器设计中常采用的方法.

为了进一步提高双通带带通滤波器的选择性, 增加其传输零点, 在图 2 结构的基础上, 改用新的馈电结构对微带贴片谐振腔进行激励, 该结构如图 5(a) 所示. 该结构可以激励起六个模式, 其等效谐振尺寸和场分布如图 6 所示. 可以发现, 在此种结构下, 该滤波器的六个模式其中有两个模式应该避免激励起来. 因此需要采用相应的措施避免模式被激励起来.

从图 6 可以看出, 前四个模式主要是由微带贴片产

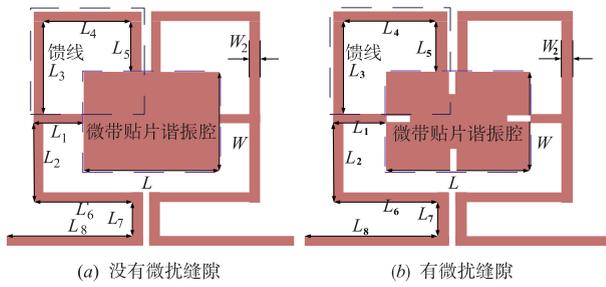


图5 第二种双模双频带带通滤波器结构

生. 其中第三个模式和第四个模式(如图 6(c)、(d)所示)模式主要是由微带双耦合线产生. 第五个模式和第六个模式是由微带矩形环和微带贴片共同产生(如图 6(e)、(f)所示). 这两个模式可以看成是二分之一波长谐振, 与微带谐振枝节类似.

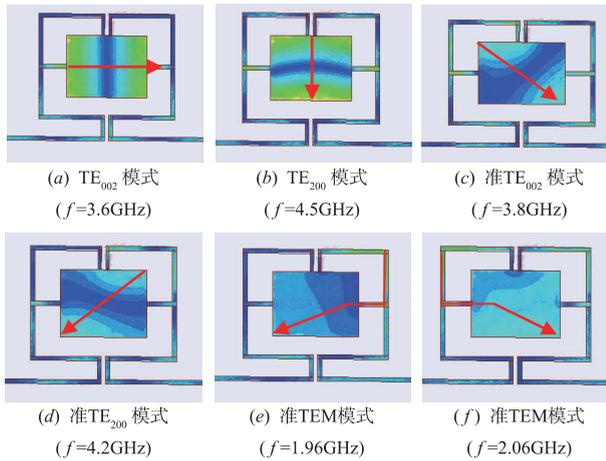


图6 六个谐振频率的电场分布及等效谐振长度(箭头红线表示其谐振长度)

除了第 3 小节中说明的引入的缝隙的作用外, 其还有另外一种作用, 即抑制特定的工作模式. 如图 5(a)所示, 在没有非谐振缝隙时, 该结构可以激励起六个模式. 在此结构的基础上, 如果通过引入微扰缝隙, 则可以避免激励起两个模式, 该两个模式在谐振频率处的场分布如图 6(c)、(d)所示. 引入微扰后的滤波器的结构如图 5(b)所示. 因此得到以下结论: 在该结构下通过引入合适的微扰缝隙, 可以大幅度的调节通带带宽.

表 2 第 II 种滤波器尺寸

参数	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
尺寸(mm)	6.9	13.2	13.2	16.7	5.0	18.0
参数	L_7	L_8	L	W	W_1	W_2
尺寸(mm)	4.9	33.0	23.5	17.6	1.1	1.1

可以发现, 该滤波器在高频端增加了传输零点, 寄生通带往高频端移动, 提高了滤波器的性能. 该滤波器的尺寸见表 2. 基于以上设计机理, 本文加工了该结构

的滤波器, 测试曲线如图 7 所示. 其 3dB 相对带宽为 20.8%/8.8%, 通带内插损分别优于 -1.7dB 和 1.8dB, 带内反射分别优于 -12dB 和 -20dB, 带外抑制也优于 -10dB, 五个传输零点分别为 2.28GHz, 3.14GHz, 4.28GHz, 4.11GHz 和 4.71dB. 可以看出, 第 II 种结构的双模双频带带通滤波器在高频端的匹配变好, 但是低频段的选择性还没有显著提高. 与图 4 的测试结果相比, 增加的传输零点全部集中于高频端, 而在低频段没有增加传输零点. 此外, 滤波器通带之间的隔离度变差, 从 -16dB 恶化为 -12dB.

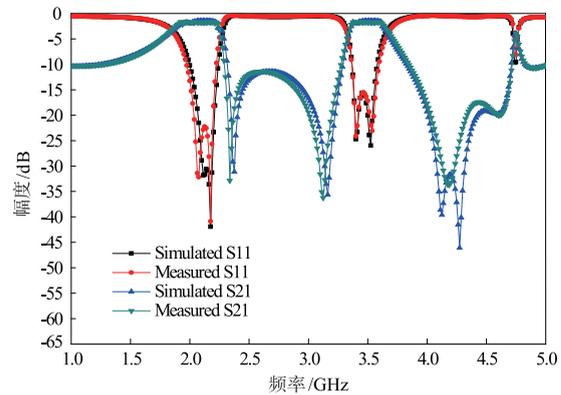


图7 第二种双通带带通滤波器的仿真与测试曲线

5 基于微带贴片谐振腔的滤波器设计 III

为了进一步增加低频段的传输零点, 提高滤波器在低频段的性能, 本节进一步改进了馈电结构, 采用双折叠耦合线的形式, 同时引入了微带枝节, 增加了谐振器的结构对称性, 形成了独立的多个谐振单元, 谐振单元之间的互耦增强, 必然会带来较多的传输零点, 其结构如图 8 所示.

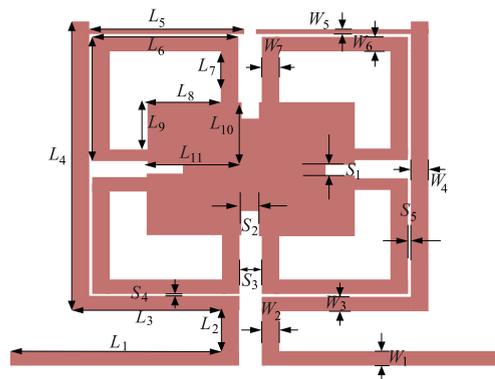


图8 第三种双模双频带带通滤波器结构

不同的微带枝节之间的距离, 其作用不同, S_1 和 S_2 主要实现对谐振频率和工作带宽的调节, S_3 影响馈电, 继而影响耦合系数; S_4 和 S_5 主要调节滤波器的外部品质因数和耦合系数.

本文对滤波器进行了加工测试,其结果如图 9 所示.可以发现,该滤波器引入了大量的传输零点,带外抑制制度达到 -20dB 左右,在低频端增加四个传输零点,使该滤波器在低频段的滤波性能得到显著改善.传输零点集中分布于双通带附近,使得该滤波器具有较好的矩形系数和带外抑制制度.该滤波器的带内反射系数优于 -20dB ,双通带之间的隔离度也优于 -20dB .该结构的滤波器尺寸见表 3.

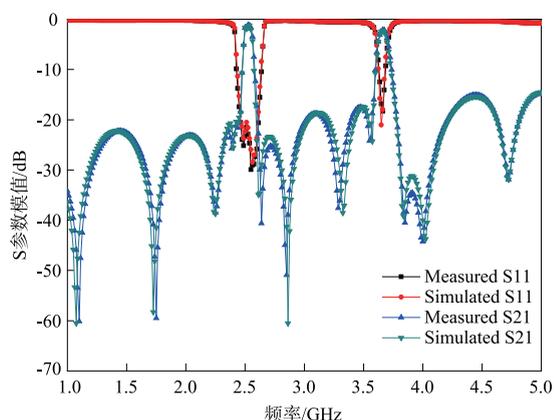


图9 第三种双通带带通滤波器的仿真与测试曲线

表 3 第 III 种滤波器尺寸

参数	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7
尺寸(mm)	20.0	4.5	18.0	34.4	19.1	18.9	6.0
参数	L_8	L_9	L_{10}	L_{11}	W_1	W_2	W_3
尺寸(mm)	9.8	7.4	8.6	11.2	1.1	1.1	1.1
参数	W_4	W_5	W_6	W_7	S_1	S_2	S_3
尺寸(mm)	1.1	0.4	1.1	1.1	0.7	1.0	1.2

实际上,该种结构的谐振器已经变形为准贴片周期结构的四模谐振器,近似为分形结构,具有窄带效应.与其他两款滤波器相比,其相对带宽变窄.为了更直观的对比本文设计的滤波器的性能,表 4 给出了本文设计的滤波器和参考文献设计的滤波器的部分技术指标对比.

表 4 滤波器指标对比

文献来源	频率(GHz)	3dB 带宽(%)	插损(dB)	传输零点	尺寸
文[1]	2.40/5.20	9.20/9.50	1.40/2.70	2	0.18 × 0.18
文[6]	2.40/5.20	5.80/6.45	3.60/3.10	2	0.15 × 0.16
文[7]	1.98/3.52	15.30/11.66	0.82/0.84	7	0.87 × 0.87
文[8]	2.43/3.67	4.10/7.90	1.20/1.67	4	0.19 × 0.19
文[9]	1.57/2.45	9.00/8.50	1.26/2.40	5	0.09 × 0.12
文[27]	1.80/5.80	11.00/6.00	1.21/3.89	5	0.25 × 0.49
I	2.40/3.60	18.2/8.2	2.23/2.44	3	0.29 × 0.41
II	2.32/3.48	20.82/8.87	1.71/1.88	5	0.46 × 0.41
III	2.53/3.67	6.72/5.45	1.22/2.13	11	0.45 × 0.41

从表中可以看出,本文设计的三款滤波器整体性能较好,设计的三款双模双通带带通滤波器工作于 WLAN(2.4GHz)和 WiMAX(3.5GHz)频段,3dB 相对带宽分别为 18.2%/8.2%, 20.82%/8.87% 和 6.72%/5.45%,插入损耗分别为 2.23dB/2.44dB, 1.71dB/1.88dB 和 1.22dB/2.13dB.其中第 III 型滤波器具有较小的尺寸,仅为 0.45×0.41 .其具有 11 个传输零点,主要分布于双通带附近,使得带外抑制度高,过渡带陡峭,带内选择性好,具有较好的矩形系数.与其他滤波器相比,该滤波器具有优异的滤波性能.

6 结论

本文研究了微带贴片谐振器模式的场分布,给出了其导模场和谐振频率的闭合公式,设计了三款不同结构的双模双通带带通滤波器.详细研究了滤波器各通带内的模式组成及形成机理,给出了各个模式的等效谐振长度.测试结果表明,设计的双模双通带带通滤波器性能良好,验证了本文理论分析的正确性.

参考文献

- [1] Li-jie Xu, Gang Zhang, Yi-ming Tang, Ya-ming Bo. Compact dual-mode dual-band bandpass filter with wide stop-band for WLAN applications[J]. Electronics Letters, 2015, 51(17):1372-1374.
- [2] 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 & Techniques, 2013, 61(3):1104-1113.
- [3] 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.
- [4] Almalkawi M, Westrick M, Devabhaktuni V, et al. Design of a dual-band dual-mode substrate integrated waveguide filter with symmetric transmission zeros[A]. Devabhaktuni V. Proceedings of Applied Electromagnetics Conference [C]. New York:IEEE Press, 2011. 1-3.
- [5] Rezaee M, Attari A R. A novel dual-mode dual-band SIW filter[A]. Wei Hong. Proceedings of Microwave Conference[C]. New York:IEEE Press, 2014. 853-856.
- [6] Shan-shan Xu, Kai-xue Ma, Fan-yi Meng, 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, 25(4):217-219.
- [7] Zhang S, Zhu L. Fully canonical dual-band bandpass filter with $\lambda/4$ stepped impedance resonators [J]. Electronics Letters, 2014, 50(3):192-194.

- [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] 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 – 1.
- [10] Guo-cheng Wu, Guang-ming Wang, Jiang-gang Liang, Xiang-jun Gao, Li Zhu. Miniaturized microstrip dual-band bandpass filter using novel symmetric double-spiral resonators for WLAN application [J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(15): 1177 – 1178.
- [11] 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.
- [12] Chen F C, Chu Q X, Li Z H, et al. Compact dual-band bandpass filter with controllable bandwidths using stub-loaded multiple-mode resonator [J]. *Microwaves Antennas & Propagation Iet*, 2012, 6(10): 1172 – 1178.
- [13] Chen J X, Yum T Y, Li J L, et al. Dual-Mode Dual-Band Bandpass Filter Using Stacked-Loop Structure [J]. *IEEE Microwave & Wireless Components Letters*, 2006, 16(9): 502 – 504.
- [14] Fu S, Wu B, Chen J, et al. Novel Second-Order Dual-Mode Dual-Band Filters Using Capacitance Loaded Square Loop Resonator [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2012, 60(3): 477 – 483.
- [15] Zhang X Y, Chen J X, Xue Q, et al. Dual-band bandpass filters using stub-loaded resonators [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2007, 17(8): 583 – 585.
- [16] 林海立, 毛军发, 张文梅. 基于 PBG 结构的双模带通滤波器设计及理论分析 [J]. *电子学报*, 2005, 33(8): 1506 – 1508.
Lin Hai-li, Mao Jun-fa, Zhang Wen-mei. Dual-mode band pass filters design based on PBG structures and theoretical analysis [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(8): 1506 – 1508. (in Chinese)
- [17] Kuo Y T, Chang C Y. Analytical design of two-mode dual-band filters using E-shaped resonators [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(2): 250 – 260.
- [18] Sung Y. Dual-mode dual-band filter with band notch structures [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2010, 20(2): 73 – 75.
- [19] Li Y C, Hang W, Xue Q. Dual-mode dual-band bandpass filter based on a stub-loaded patch resonator [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2011, 21(10): 525 – 527.
- [20] Li R Q, Tang X H, Xiao F. Substrate integrated waveguide dual-mode filter using slot lines perturbation [J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(12): 845 – 846.
- [21] Luo S, Zhu L, Sun S. A Dual-band ring-resonator bandpass filter based on two pairs of degenerate modes [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, 58(12): 3427 – 3432.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] M. H. Weng, S. Wu, S. B. Jong, Y. C. Chang, M. S. Lee. A novel compact dual-mode filter using cross-slotted patch resonator for dual-band applications [A]. Yoshio Nikawa. *MTT-S International Microwave Symposium [C]*. New York: IEEE Press, 2007. 921 – 924.
- [27] Y. K. Su, J. R. Chen, M. H. Weng, C. Y. Hung. A right slotted patch dual-mode dual band bandpass filter used for WLAN [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2009, 51(2): 491 – 494.
- [28] Y. Sung. Dual-mode dual-band filter with band notch structures [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2010, 20(2): 73 – 75.
- [29] Jian-xin. Chen, X. Zhang, Q. Xue. Dual-band bandpass filter and diplexer based on double-sided parallel-strip Line [A]. Dao Ming. *MTT-S International Microwave Symposium [C]*. New York: IEEE Press, 2008. 936 – 939.
- [30] Yuan Chun Li, Hang Wong, Quan Xue. Dual-mode dual-band bandpass filter based on a stub-loaded patch resonator [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2011, 21(10): 525 – 527.
- [31] Genc A, Baktur R, Jost R J. Dual-bandpass filters with individually controllable passbands [J]. *Microwave Theory and Techniques IEEE Transactions on*, 2013, 3(1): 105 – 112.
- [32] Ya-tao Peng, Li-jun Zhang, Jun Fu, Yu-dong Wang, Yong-qing Leng. Compact dual-band bandpass filter using cou-

pled lines multimode resonator[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(4): 235 – 237.

- [33] Ming-Chun Tang, Ting Shi, Shi-yong Chen, Hai-lin 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.

作者简介



王树兴 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

吴 瑛 女, 1960 年出生于河南郑州, 工学硕士, 解放军信息工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为数字信号处理, 阵列信号处理及其 DSP 实现. E-mail: hnwuying22@163.com