

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2016.12.026

基于 CSRR-HMSIW 和 CSRR-DGS 谐振器的双带滤波器研究^①

张中华^{1,2}, 李光林¹, 黄杰¹, 陈志林¹, 熊昆¹

1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715; 2. 重庆安全技术职业学院 机电工程系, 重庆 404020

摘要: 为满足滤波器在双频带通信系统中的发展要求, 提出了一种基于互补开口谐振环半模基片集成波导(CSRR-HMSIW)加载互补开口谐振环缺陷接地(CSRR-DGS)的新型双带滤波器. 根据 CSRR-HMSIW 和 CSRR-DGS 的传输特性, 提出了一种 CSRR-HMSIW 和 CSRR-DGS 并联的双谐振结构, 实现了一个双通带滤波器. 利用精确设计 CSRR-HMSIW 的结构参数, 确定其谐振频点和传输零点, 实现以该谐振频点为中心的第一个通带; 精确设计 CSRR-DGS 外边长和对应的开路支线长度、宽度, 确定开路支线和 CSRR-DGS 彼此间的耦合产生谐振频点, 实现以该谐振频点为中心的第二个通带, 同时该结构引入一个传输零点, 进一步加强第二通带高频段的带外抑制特性. 设计和制作了一款工作于 2.5 GHz 和 5.4 GHz 的双带滤波器, 测试两通带插入损耗小于 2.4 dB、两通带间的隔离高达 55 dB 和带外抑制达到 45 dB, 测试与模拟仿真结果吻合良好.

关键词: 互补开口谐振环(CSRR); 半模基片集成波导(HMSIW); 加载; 缺陷接地结构(DGS); 双带滤波器

中图分类号: TN713+.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2016)12-0162-07

随着物质生活水平的提高, 人们对工作在两个或多个频段的通信系统需求也越来越迫切, 而滤波器是通信系统中不可或缺的组成部分^[1], 因此很多学者对双带滤波器展开了系统研究^[2-7]. 目前, 设计双带滤波器常用方法有级联带通和带阻滤波器^[2]、一谐振器嵌入另一谐振器^[3]、并联两谐振器^[4-5]、双模或多模特性谐振器^[6-7].

半模基片集成波导(HMSIW)具有体积小、制作方便、成本低、易集成于微波毫米波电路等优点^[8]. 其中, HMSIW 加载互补开口谐振环(CSRR)设计了高性能、小尺寸的带通滤波器^[9]. 为了进一步适应无线通信系统的发展, 利用 CSRR-HMSIW 和其他结构结合设计双带滤波器^[10-11], 然而该滤波器^[10]带外抑制较差. 缺陷接地结构(DGS)是设计微波无源滤波器的重要结构之一, 利用各种形状 DGS 设计了滤波器^[12-13], 然而滤波器插损较大、带外抑制水平较差. 为了设计高性能滤波器, 提出了互补开口谐振环缺陷接地结构(CSRR-DGS), 该结构设计滤波器具有带内插损低、通带边缘衰减斜坡陡峭和带外抑制水平高等优点^[14].

本文通过分析 CSRR-HMSIW 加载 CSRR-DGS 谐振器的传输特性, 利用级联两单元结构设计了一款基于 CSRR-HMSIW 和 CSRR-DGS 谐振器的双带滤波器, 其两通带中心频率分别由 CSRR-HMSIW 和 CSRR-DGS 的结构参数独立控制. 采用标准 PCB 工艺制作并测试了该双带滤波器, 其测试与仿真结果基本一致.

① 收稿日期: 2015-04-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(64101373); 中央高校基本业务费专项资助项目(XDJK2013B004, 2362014xk13); 西南大学博士启动基金(SWU111030).

作者简介: 张中华(1989-), 男, 重庆万州人, 硕士研究生, 主要从事射频、微波器件等方面的研究.

通信作者: 黄杰, 副教授, 博士.

1 谐振器分析

1.1 CSRR-HMSIW 加载 CSRR-DGS 结构特性分析

图 1 为 CSRR-HMSIW 谐振器结构^[9], 其结构的谐振频率 f_0 小于 HMSIW 的截止频率 f_c , f_c 可由式(1)计算可得, 式中 ϵ_r 为介质基片的介电常数, c 为电磁波在真空中的传播速度^[15], 其谐振频率由 CSRR 的外环边长 d 控制. CSRR-HMSIW 滤波器的外部品质因素 Q 主要由 CSRR 与输入/输出端的金属宽度 L_1 和金属宽度 t 控制^[16], Q 通过式(2)计算可得, 式中 f_0 为滤波器的中心频率, $BW_{3\text{ dB}}$ 为滤波器的 3 dB 带宽.

$$f_c = \frac{c}{4\omega \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

$$Q = \frac{2f_0}{BW_{3\text{ dB}}} \quad (2)$$

根据 CSRR-HMSIW 和 CSRR-DGS 谐振器的传输特性, 提出一种 CSRR-HMSIW 和 CSRR-DGS 并联的双谐振结构, 如图 2 所示. 顶层和底层刻蚀的 CSRR 结构开口相对. 其顶层 CSRR 的具体参数为 $d = 7.1\text{ mm}$, $g = 0.25\text{ mm}$, $a = 1\text{ mm}$, $b = 0.3\text{ mm}$, $w = 8.6\text{ mm}$, $t = 0.3\text{ mm}$, $L_1 = 1.5\text{ mm}$; 接地层 CSRR 对应的参数 $d_1 = 4.2\text{ mm}$, $g_1 = 0.25\text{ mm}$, $a_1 = 0.25\text{ mm}$, $b_1 = 0.25\text{ mm}$; 开路支线的宽度为 $L_2 = 1\text{ mm}$, $s_1 = 4.2\text{ mm}$; HMSIW 波导金属化过孔直径为 0.8 mm , 相邻过孔间距为 1.4 mm . 利用电磁场仿真软件 HFSS 13 分别分析 CSRR-HMSIW 加载 CSRR-DGS 谐振器单元结构、相同尺寸的 CSRR-HMSIW 谐振器结构以及传统 HMSIW 结构的传输特性, 其对应的传输特性曲线如图 3 所示, 从图 3 中星形线可知 HMSIW 的截止频率为 5.9 GHz , 与式(1)计算 f_c 结果吻合, 谐振器产生的谐振频率小于截止频率; 图 3 中三角形线表示 CSRR-HMSIW 谐振器的传输特性, 圆形线表示 CSRR-HMSIW 加载 CSRR-DGS 谐振器的传输特性, 由图比较可知第一个谐振频点、传输零点由 CSRR-HMSIW 结构产生, 高频段的谐振频点、传输零点由 CSRR 和开路支线耦合产生. 因此, 利用这种结合方式实现了 CSRR-HMSIW 和 CSRR-DGS 结构的双谐振特性.

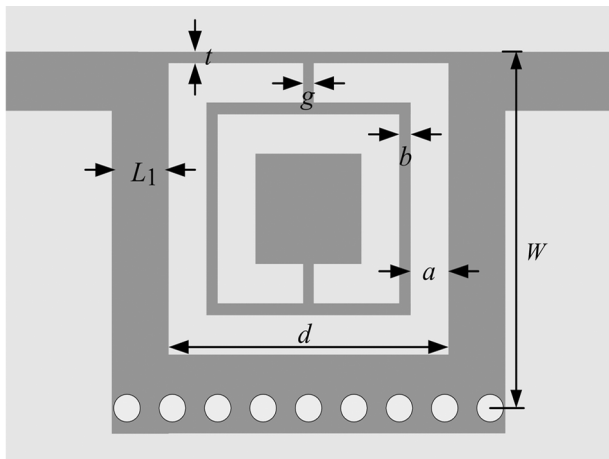


图 1 CSRR-HMSIW 谐振器结构示意图

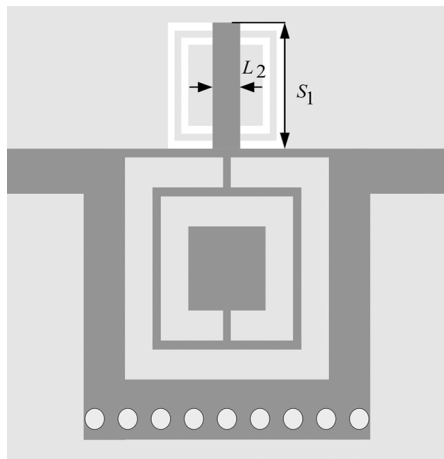


图 2 双谐振单元结构示意图

1.2 单元结构等效电路参数提取

CSRR-HMSIW 加载 CSRR-DGS 谐振器单元结构中的金属过孔等效为电感 L_s ; CSRR-DGS 自身构成并联谐振电路, 等效为电容 C_g 和电感 L_g ; 开路支线与 CSRR-DGS 间存在电容耦合, 等效为电容 C ; CSRR-HMSIW 自身构成并联谐振电路, 等效为电容 C_c 和电感 L_c , 且内部存在电容耦合, 等效为电容 C_2 ; HMSIW 的电感效应等效为 L_1 和 L_2 ; 最终得到的单元等效电路模型如图 4(a)所示. 由于该单元结构相对比较简单, 可以很方便地采用曲线拟合技术提取出相应结构的电路元件值, 提取过程如下:

第一个谐振频率 f_1 由 CSRR-HMSIW 等效的并联电路 L_c 和 C_c 决定, f_1 可表示为式(3); 第一个传输零点 f_{z1} 由并联电路 L_2 和 C_2 决定, f_{z1} 可表示为式(4); 第二个谐振频率 f_2 由 CSRR-DGS 等效的并联电路 L_g 和 C_g 决定, f_2 可表示为式(5); 第二个传输零点 f_{z2} 由并联之路 L_g 、 C_g 和 C 决定, f_{z2} 可表示为式(6); 根据该结构的分散特性, 推出等式(7), $\phi = \beta l$ (式中 β 为相位传播常数, l 为物理长度) 为基本单元的相位, Z_1 和 Z_2 分别代表基本单元的串联和并联阻抗, 当相位为 $\pi/2$ 时, 推出等式(8). f_1 , f_{z1} , f_2 , f_{z2} , $f_{\pi/2}$ 很容易通过仿真和经验确定, 因此, 对应 L_c , C_c , L_2 , C_2 , L_g , C_g , C 和 L_1 的值易被提取, L_s 利用优化和曲线拟合来提取. 图 4(a) 中等效电路模型参数元件值为 $L_1=1.14$ nH, $C=0.33$ pF, $C_g=0.57$ pF, $L_g=0.8$ nH, $C_2=1.35$ pF, $L_2=0.65$ nH, $C_c=5.3$ pF, $L_c=3.25$ nH, $L_s=1.3$ nH.

通过利用 Ansoft HFSS 建模对单元结构仿真分析和 ADS 对等效电路仿真分析, 对应的仿真结果如图 4(b) 所示, 图中实线表示单元结构仿真, 虚线表示等效电路仿真, 从图中可见单元结构和等效电路的仿真曲线在谐振频点和传输零点吻合较好.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_c C_c}} \quad (3)$$

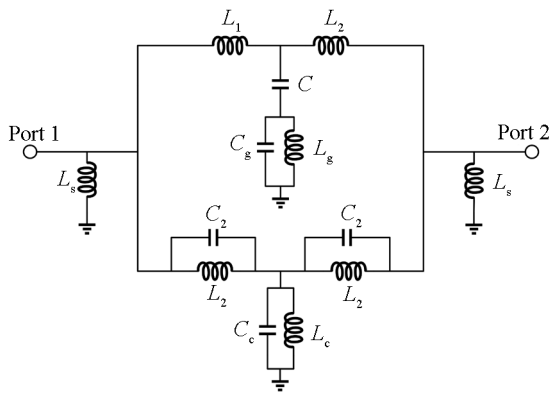
$$f_{z1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (4)$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_g C_g}} \quad (5)$$

$$f_{z2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_g (C_g + C)}} \quad (6)$$

$$\cos\varphi = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \quad (7)$$

$$Z_1(j\omega_{\pi/2}) = -Z_2(j\omega_{\pi/2}) \quad (8)$$



(a) 双谐振器单元结构的等效电路

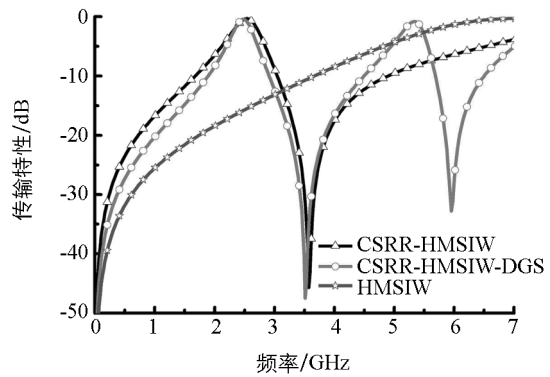
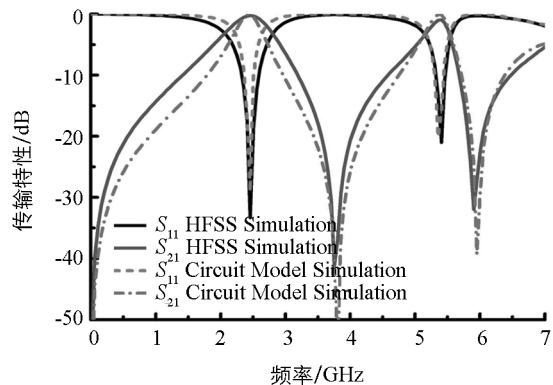


图 3 HMSIW、CSRR-HMSIW、CSRR-HMSIW 加载 CSRR-DGS 谐振器的传输特性



(b) 图2和图4(a)仿真拟合曲线

图 4 等效电路和对应的传输特性

1.3 单元结构参数分析

为了验证提出的双谐振器结构特性, 利用电磁场仿真软件 Ansoft HFSS 13 分别分析双谐振单元结构

中顶层 CSRR 刻蚀金属宽度 a 和底层 CSRR 刻蚀外环金属长度 d_1 对传输特性的影响, 其它参数结构不变, 对应的传输特性曲线如图 5 所示, 从图 5(a)可知当增大顶层 CSRR 刻蚀金属宽度 a 时, 第一个传输零点向右移动, 两个谐振频率和第二个传输零点几乎不变; 由图 5(b)可知当增大底层 CSRR 刻蚀外环金属长度 d_1 时, 高频段的谐振频率和传输零点向左移动, 对第一个通带特性无影响.

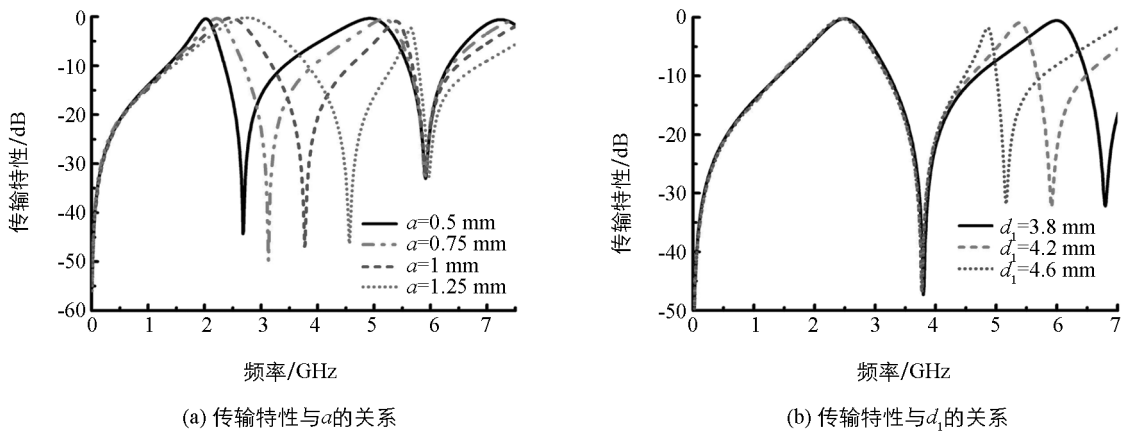


图 5 单元结构的传输特性

2 双频带滤波器的设计

基于对双谐振结构特性的分析, 在介电常数为 2.2、厚度为 0.508 mm 的基片上设计了一款双带滤波器, 其结构如图 6 所示, 滤波器由两个 CSRR-HMSIW 加载 CSRR-DGS 谐振器结构和馈电网络组成, 其中利用锥形渐变线实现了半模基片集成波导和输入/输出馈电线间的模式转换和阻抗变换. 滤波器的外部品质因素 Q 主要由 L_1 和 t 控制, 锥形渐变线的长度 L_4 和宽带 w_t 也可调节外部品质因素. 两个谐振频率的耦合系数可分别由参数 L 和 L_3 单独控制, 其对应的关系曲线如图 7 所示, 从图中可知当增大两个 CSRR-HMSIW 之间的距离 L_3 , L 保持不变, 第一个谐振频率的耦合系数减少, 第二个谐振频率的耦合系数保持不变; 当增大两个 CSRR-DGS 之间的距离 L (开路支路与 CSRR-DGS 同时移动), L_3 保持不变, 第二个谐振频率的耦合系数减少, 第一个谐振频率的耦合系数不变. 因此可得第一个谐振频率的耦合系数由 L_3 控制, 第二个谐振频率的耦合系数由 L 控制, 利用它们之间的耦合可独立控制. 设计的两个通带的中心频率为 2.5 GHz 和 5.4 GHz, 这里的 $L_3=3$ mm, $L=10.1$ mm, $w_t=2$ mm, $L_4=3$ mm, $L_1=0.5$ mm, 两个谐振器之间的耦合系数 K 分别为 0.064 和 0.057, 外部品质因素 Q 分别为 16.7 和 54.

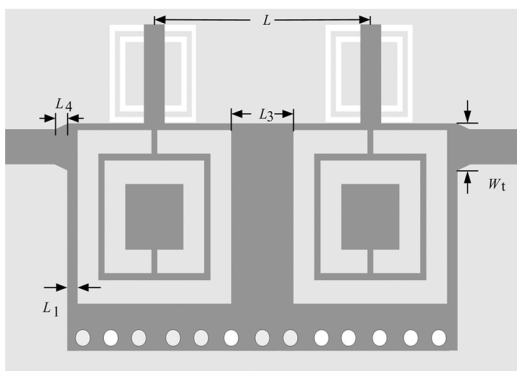


图 6 双带滤波器的结构示意图

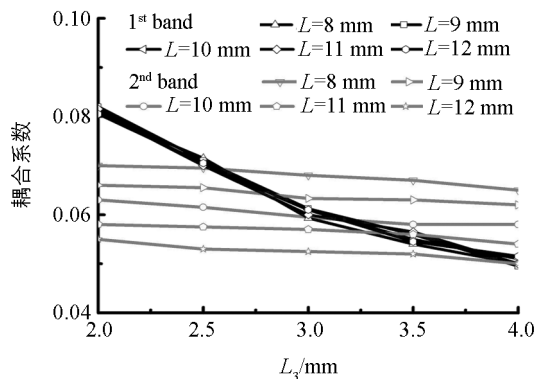


图 7 耦合系数与 L 、 L_3 变化关系

3 双带滤波器性能测试与分析

为了验证基于 CSRR-HMSIW 和 CSRR-DGS 谐振器设计的双带滤波器, 采用标准 PCB 工艺制作的实

物图, 如图 8 所示, 其结构尺寸为 $18.2 \times 13.3 \text{ mm}$ ($0.21\lambda_g \times 0.155\lambda_g$, λ_g 为第一个通带中心频率所对应的波长). 利用 Agilent N5242A 型矢量网络分析仪测试性能, 测试与仿真结果比较如图 9 所示, 图中实线表示仿真结果, 虚线表示测试结果. 测试的两通带中心频率为 2.5 GHz 和 5.4 GHz(与仿真一致), 对应的 -3 dB 带宽分别为 12% 和 3.7%(与仿真一致), 最小插入损耗分别为 2.1 dB 和 2.4 dB(仿真的最小插入损耗分别为 0.44 dB 和 1.43 dB), 最大回波损耗分别为 30 dB 和 35 dB(仿真的最大回波损耗分别为 36 dB 和 48.5 dB), 在 3.75 GHz 处获得了传输零点, 实现了两个通带隔离达到 55 dB 以上, 另一传输零点在 5.9 GHz 处获得, 其衰减达到 45 dB(仿真的两传输零点对应衰减分别为 67.1 dB 和 68.2 dB), 获得两传输零点提高了双带滤波器的选择性和带外抑制水平. 对图 9 的数据分析可知, 测试与仿真的带内插损最大相差 1.65 dB、回波损耗最大相差 13.5 dB、两通带间隔离最大相差 12.1 dB、高频段传输零点衰减最大相差 23.2 dB, 其差异主要是由器件加工误差、金属损耗、SMA 接头损耗和镀金工艺等因素造成, 双带滤波器的测试性能与仿真基本一致.

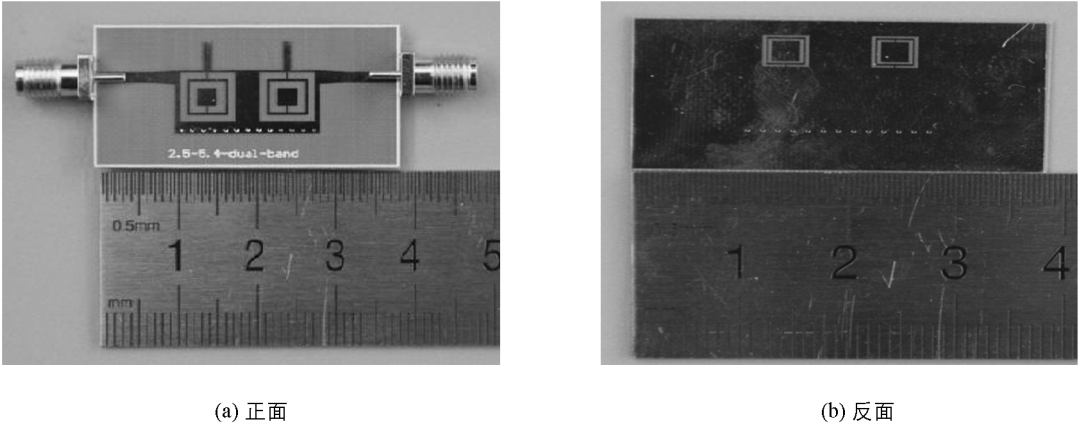


图 8 双带滤波器实物图

针对本文设计的滤波器和文献[2, 6, 9—10, 17—18]中提出的滤波器在尺寸和性能上进行比较, 其比较数据如表 1, 从表中可知设计的双带滤波器体积小于文献中提出的滤波器, 带内插损和带外抑制也明显优于文献中提出的滤波器, 综合比较可得本文设计的双带滤波器实现了小尺寸、较低插损和高带外抑制水平.

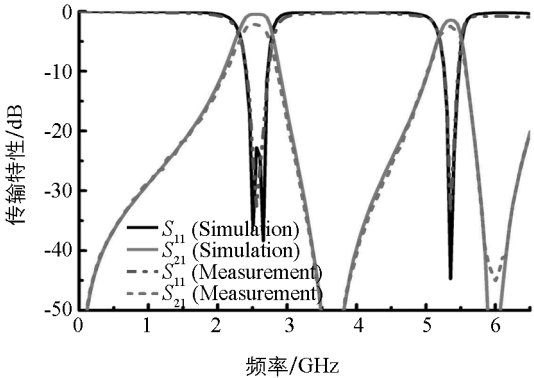


图 9 双带滤波器测试与仿真结果比较

表 1 设计的双带滤波器与文献提出的滤波器比较

文献	滤波器类型	中心频率/ GHz	面积/ mm ²	插入损耗/ dB	带外抑制/ dB
[2]	短路枝线微带型	2.4/5.4	373.5	2.5/2.6	40/30
[6]	阶跃微带闭环型	2.4/5.2	265	2.5/3.2	30/15
[9]	半模基片集成波导型	3.5/5.85	101.8	2.2/1.8	20/45
[10]	半模基片集成波导型	3.5/5.8	101.5	2.9/2.8	48/30
[17]	网络型	1/2	1 327	2.65/2.44	20/25
[18]	开口谐振环级联型	2.45/5.2	649	3.5/3.55	48/40
设计的滤波器	半模基片集成波导型	2.5/5.4	242	2.1/2.4	55/45

4 结 论

本文通过利用 CSRR-HMSIW 产生的谐振频点和高滚边斜率特性,以及 CSRR-DGS 谐振器产生的谐振频点和高滚边斜率特性,设计了一款基于 CSRR-HMSIW 和 CSRR-DGS 的双带滤波器,两通带的中心频率分别由 CSRR-HMSIW 和 CSRR-DGS 的结构参数独立控制,采用标准 PCB 工艺制作并测试了双带滤波器,测试结果表明,两通带的工作频率分别为 2.5 GHz 和 5.4 GHz,回波损耗达到了 25 dB 以上.该滤波器在两通带间和低频阻带分别有一个传输零点,实现了两通带间隔离高达 55 dB、高频阻带衰减达到 45 dB,该双带滤波器可用于通信设备中,同时该构造方式为微波滤波器的研究和发展奠定了基础.

参考文献:

- [1] 王代强,陈雨青,徐稀媛,等.变迹加权三角形 IDT 结构的 SAW 滤波器设计与实现[J].西南大学学报(自然科学版),2011,33(7):31—35.
- [2] TSAI L C, HUSE C W. Dual-Band Bandpass Filters Using Equal-Length Coupled-Serial-Shunted Lines and Z-Transform Techniques[J]. IEEE Microwave Theory and Techniques, 2004, 52(4): 1111—1117.
- [3] CHEN C Y, HSU C Y, CHUANG H R. Design of Miniature Planar Dual-Band Filter Using Dual-Feeding Structures and Embedded Resonators[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2006, 16(12): 669—671.
- [4] CHEN C Y, HSU C Y. A Simple and Effective Method for Microstrip Dual-Band Filters Design[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2006, 16(3): 246—248.
- [5] CHEN J X, YUM T Y, LI J L, et al. Dual-Mode Dual-Band Bandpass Filter Using Stacked-Loop Structure[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2006, 16(9): 502—504.
- [6] HUANG T H, CHEN H J, CHANG C S, et al. A Novel Compact Ring Dual-Mode Filter with Adjustable Second-Passband for Dual-Band Applications[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2006, 16(6): 306—362.
- [7] SUN S, ZHU L. Compact Dual-Band Microstrip Bandpass Filter without External Feeds[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005, 15(10): 644—646.
- [8] WANG Y, HONG W, DONG Y, et al. Half Mode Substrate Integrated Waveguide (HMSIW) Band-Pass Filter[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, 17(4): 265—267.
- [9] SENIOR D E, CHENG X, MACHADO M, et al. Single and Dual-Band Bandpass Filters Using Complementary Split Ring Resonator Loaded Half Mode Substrate Integrated Waveguide[C]//Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), Toronto, Canada, IEEE, 2010: 1—4.
- [10] SENIOR D E, CHENG X, YOON Y K. Dual-Band Filter Using Complementary Split-Ring Resonator and Capacitive Loaded Half-Mode Substrate-Integrated-Waveguide[C]//Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), Chicago, Illinois: IEEE, 2012: 1—2.
- [11] 张中华,黄杰,李光林,等.基于 CSRR-HMSIW 和紧凑型短路 CRLH-TL 谐振器的双带滤波器研究[J].西南大学学报(自然科学版),2015,37(2):167—172.
- [12] PARUI S K, DAS S. An Asymmetric Defected Ground Structure with Elliptical Response and Its Application as A Low-pass Filter[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2009, 63(6): 483—490.
- [13] CHAUDHARY G, CHOI H, JEONG Y, et al. Design of Dual-Band Bandpass Filter Using DGS With Controllable Second Passband[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2011, 21(11): 589—591.
- [14] SHARMA R, CHAKRAVARTY T, BHOOSHAN S, et al. Design of A Novel 3-Db Microstrip Backward Wave Coupler Using Defected Ground Structure[J]. Progress In Electromagnetics Research, 2006, 65: 261—273.
- [15] SENIOR D E, CHENG X, YOON Y K. Electrically Tunable Evanescent Mode Half-Mode Substrate-Integrated-Waveguide Resonators[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2012, 22(3): 123—125.
- [16] HONG J S, LANCASTER M J. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications[M]. New York: Wiley, 2001: 258—264.

- [17] TSENG C H, SHAO H Y. A New Dual-Band Microstrip Bandpass Filter Using Net-Type Resonators [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2010, 20(4): 196—198.
- [18] MONDAL P, MANDAL M K. Design of Dual-Band Bandpass Filters Using Stub-Loaded Open-Loop Resonators [J]. IEEE Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(1): 150—155.

Dual-Band Filter Based on CSRR-HMSIW and CSRR-DGS Resonator

ZHANG Zhong-hua^{1,2}, LI Guang-lin¹, HUANG Jie¹,
CHEN Zhi-lin¹, XIONG Kun¹

1. School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Chongqing Vocational Institute of
Safety Technology, Chongqing 404020, China

Abstract: To meet the development requirements of the filter in the dual-band communication system, a novel dual-band filter is presented, which is based on the half mode substrate integrated waveguide (HMSIW) loaded with the complementary split-ring resonator (CSRR) and the complementary split-ring resonator defected ground structure (CSRR-DGS). According to the transmission characteristics of CSRR-HMSIW and CSRR-DGS, a double resonance structure which parallels CSRR-HMSIW and CSRR-DGS is proposed to implement a dual-band filter. Owing to the structure parameters of CSRR-HMSIW, the resonant frequency point and transmission zero is determined, achieving the resonance frequency point as the center of the first passband. The out ring side length of CSRR-DGS and the length, width of the open stub is accurately designed to produce coupling resonance frequency point between the open stub and the CSRR-DGS, which is used to achieve its center point as a second passband, a transmission zero of the structure is introduced to further strengthen out-of-band rejection characteristic form the second passband with high frequency. A dual-band filter operating at 2.5 GHz and 5.4 GHz is designed and fabricated. Its measured insertion loss of the two passbands is less than 2.4 dB, and the isolation between two passbands is better than 55 dB, and the out-of-band rejection level is more than 40 dB. The measured results are in good agreement with the simulated ones.

Key words: complementary split-ring resonator(CSRR); half-mode substrate integrated waveguide(HMSIW); loaded with; defected ground structure(DGS); dual-band filter

责任编辑 汤振金

