

doi: 10. 3788/gzxb20174606. 0616005

基于超材料结构的小型化可调滤波器

赵亚娟^{1,2}, 王东红^{1,2}, 张泽奎^{1,2}, 张榕^{1,2}, 李宝毅^{1,2}, 张晗^{1,2}

(1 中国电子科技集团公司第三十三研究所, 太原 030006)

(2 电磁防护材料及技术山西省重点实验室, 太原 030006)

摘 要: 为了提高频谱资源的利用率, 解决传统滤波器组体积大的问题, 利用开口环结构的超材料具有高集成度的特性, 设计了一款整体尺寸仅为 15 mm×20 mm 的滤波器. 基于时域有限积分法分析了开口环结构滤波器的反射系数曲线与电磁参数之间的响应特性, 通过在开口环缝隙处加载可调谐的二极管器件, 实现了超材料滤波器在 X 波段(10.9~12 GHz)的连续可调, 扩展了滤波器的工作频带. 该可调谐超材料滤波器的工作带宽达 11.0%, 通带内回波损耗最小值为 32 dB, 插入损耗最大值为 0.38 dB, 具有高集成度、宽频带、通带内选频特性良好的特点.

关键词: 超材料; 滤波器; 二极管; 开口谐振环; 频率可调

中图分类号: TN927+. 23

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)06-0616005-5

A Compact Tunable Filter Based on Metamaterial Structure

ZHAO Ya-juan^{1,2}, WANG Dong-hong^{1,2}, ZHANG Ze-kui^{1,2}, ZHANG Rong^{1,2}, LI Bao-yi^{1,2}, ZHANG Han^{1,2}

(1 No. 33 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan 030006, China)

(2 Electromagnetic Protection Materials and Technology Key Laboratory of Shanxi Province, Taiyuan 030006, China)

Abstract: To improve the utilization of spectrum resources and solve the problem of large volume of traditional filter, a metamaterial filter with a compact size of 15 mm×20 mm was designed by using the high integration split-ring resonators. Based on time domain finite integral method, the response between the reflection coefficient curve of the split-ring structure filter and the electromagnetic parameters was analyzed. By loading tunable diode into the gap of split-ring, the filter was continuously tunable at X-ray band (from 10.9 GHz to 12 GHz), extending the operating frequency band of the filter. The bandwidth of the designed filter is about 11.0%, return loss minimum is 32 dB and insertion loss maximum is 0.38 dB. The results illustrate that the split-ring metamaterial filter shows the characteristics of compact size, wide bandwidth and good band pass.

Key words: Metamaterial; Filter; Diode; Split-ring resonators; Frequency tunable

OCIS Codes: 160.3918 ; 120.2440 ; 310.6845 ; 350.2450

0 引言

随着现代无线通信系统的飞速发展, 频谱资源变得越来越紧张. 为了提高频谱资源的利用率, 多通带、扩跳频和动态频率分配等频谱技术得到广泛应用. 传统的多频带滤波器是将几个频带固定的滤波器组合到一起, 通过电控开关来选取不同的滤波器^[1-3]. 但是滤波器组一般体积较大, 不符合当前接收机射频前端电路小型化、集成化的主流趋势. 因此, 研究设计小型化的可调滤波器越来越受到关注^[4-6].

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (No. 2013CBA01700), 中国电子科技集团公司山西省重点实验室专项资金项目 (No. ZX15ZS391), 国家国际科技合作专项资助课题 (No. 2014DFR10020), 山西省青年科技研究基金 (No. 2015021083), 中国电子科技集团公司山西省重点实验室专项资金项目 (No. ZX15ZS392)

第一作者: 赵亚娟 (1989-), 女, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为电磁防护材料及技术. Email: 798710363@qq.com

收稿日期: 2017-02-08; **录用日期:** 2017-03-14

<http://www.photon.ac.cn>

超材料也被称为人工电磁材料、异向介质、特异材料等,它是指至少具备负的介电常数或负的磁导率中某一特性,并以周期性或非周期性人造微结构排列而成的人工复合材料^[7-9].超材料具备参数可设计性、亚波长谐振和高 Q 值等显著特性,被视为微波器件的电磁调控特性和高选频特性设计的一种理想谐振器,激发了超材料在滤波器方面的应用研究^[10-12].由于开口谐振环(Split Ring Resonator, SRR)所具有的结构简单、易于分析的优点,使其成为超材料单元结构设计的首选.邹玉鹏^[13]设计了一款基于开口谐振环的滤波器,开口谐振器分布在介质基板的顶层和底层,滤波器具有高性能和小型化特点.实测结果表明滤波器的工作频率为 4.9 GHz~5.2 GHz,通带内的实测插入损耗为 1.7 dB. Ali K G 等^[14]设计了双频段超材料滤波器,四个对称结构的开口环谐振器通过微带线耦合馈电,中心频率为 2.4 GHz 和 3.5 GHz,小型化滤波器尺寸为 18.1 mm×14 mm. Liu H W 等^[15]提出了基于开口谐振环结构的超材料滤波器,工作频率在 1.6 GHz、2.1 GHz、4.6 GHz、5.1 GHz,整体尺寸为 11.1 mm×14.9 mm,具有小型化和集成化的特点. Vaishali R 等^[16]设计了一款对称结构的超材料滤波器,采用开口谐振环实现三频谐振特性,中心频率为 2.8 GHz、3.0 GHz、3.2 GHz.

本文设计了一款基于开口环结构的可调超材料滤波器,采用单个超材料可调谐滤波器的射频端电路占用的面积小,整体尺寸为 15 mm×20 mm.滤波器采用对称结构的开口环谐振器以实现带通滤波特性.

1 开口环结构的可调超材料滤波器设计

1.1 基于超材料的滤波器结构设计

由于超材料单元结构设计的滤波器,具有亚波长谐振和高 Q 值等显著特性,它被视为微波器件小型化设计的一种理想谐振器.图 1 为 SRR 和互补型开口谐振环(Complementary Split Ring Resonator, CSRR)的单元结构及等效电路.经典的开口谐振环 SRR 易呈现负的有效磁导率,等效电路显示 SRR 具有带通滤波特性,互补开口谐振环 CSRR 是 SRR 的一种互耦合结构,同样呈现负的有效磁导率,等效电路图显示 CSRR 具有带阻滤波特性,因此, SRR 和 CSRR 结构为超材料单元结构提供丰富的设计基础.

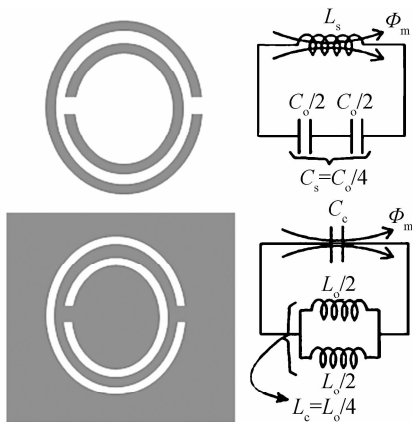


图 1 SRR 和 CSRR 单元结构

Fig. 1 Unit structure of SRR and CSRR

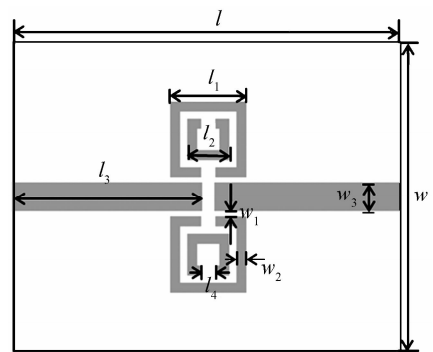


图 2 开口谐振环结构的滤波器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of filter based on split-ring resonator structure

基于经典开口谐振环 SRR 的改进模型设计了一款带通滤波器,结构如图 2.滤波器结构包括 3 层,上层为两个对称结构的开口谐振环,位于微带线的上下两侧,中间层为介质基板,下层为接地板.滤波器的工作频率为 10.2 GHz,采用介电常数为 2.2、损耗角的正切值为 0.000 9 的罗杰斯 Rogers 5880 作为介质基板.超材料滤波器的具体参数为: $l=20$ mm, $w=15$ mm, $l_1=3.1$ mm, $l_2=2.2$ mm, $l_3=14.7$ mm, $l_4=0.6$ mm, $w_1=0.2$ mm, $w_2=0.3$ mm, $w_3=1.2$ mm.

利用三维高频电磁仿真软件(Computer Simulation Technology, CST)建立仿真模型,设计了 X 波段超材料结构带通滤波器,采用时域有限积分算法分析计算了开口环结构的滤波器的反射系数曲线.通过对滤波器结构进行敏感性分析,发现开口环结构的外环长 l_1 和内外环的间距 w_2 是影响滤波器滤波特性的主要因素. l_1 和 w_2 对反射系数的影响曲线如图 3 和图 4.由图 3 可知,随着 l_1 的逐渐增大,滤波器的谐振频率逐渐减小.由图 4 可知,随着 w_2 的逐渐增大,滤波器的谐振频率逐渐增大.

基于超材料的滤波器散射系数曲线如图 5,其中 S_{11} 表示反射系数, S_{21} 表示传输系数. 仿真结果表明,基于超材料的滤波器工作在 X 波段(10.3~10.7 GHz),工作带宽为 4.0%,通带内插入损耗为 0.4 dB,回波损耗 37 dB. 然而,单频段滤波器并不能满足通信系统的需求. 通过添加二极管器件,实现基于超材料的滤波器在 X 频段内连续可调.

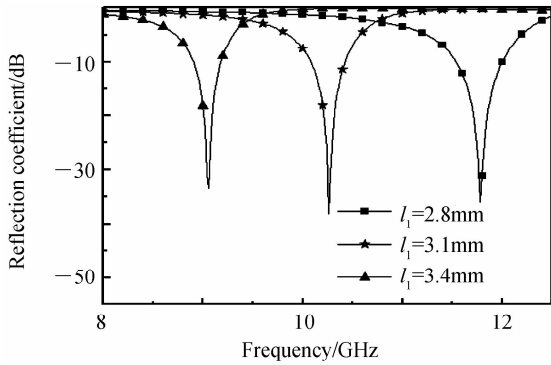


图 3 反射系数随 l_1 的变化曲线
Fig. 3 Curve of reflection coefficient with l_1

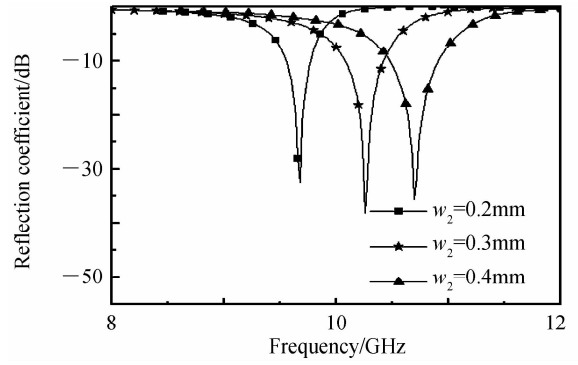


图 4 反射系数随 w_2 的变化曲线
Fig. 4 Curve of reflection coefficient with w_2

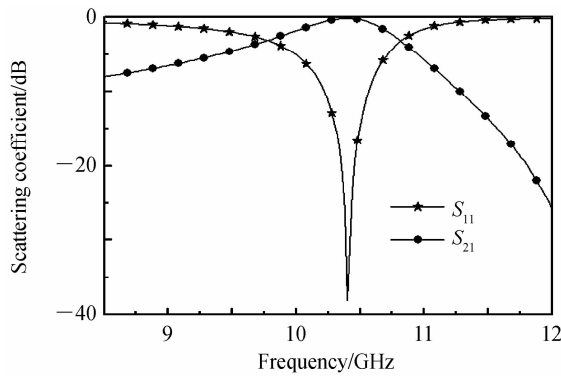


图 5 超材料滤波器的散射系数
Fig. 5 Scattering coefficient of metamaterial filter

1.2 基于超材料的可调滤波器设计

在开口环结构滤波器上添加二极管可调谐器件,通过外加激励人为地改变二极管的位置或材料的物理特性从而操控电磁特性(等效介电常数、等效磁导率等),实现中心频率可调的滤波器设计,解决当前 X 频段窄的难题.

设计的基于开口环结构的可调超材料滤波器的仿真结构如图 6,在开口环结构内环开口处加载变容二极管,其中左侧为低电压,右侧为高电压. 利用 CST 三维电磁仿真软件建立可调超材料滤波器仿真模型,获

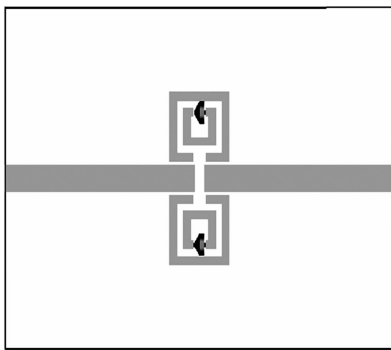


图 6 可调超材料滤波器的结构示意图
Fig. 6 Structures of tunable metamaterial filter

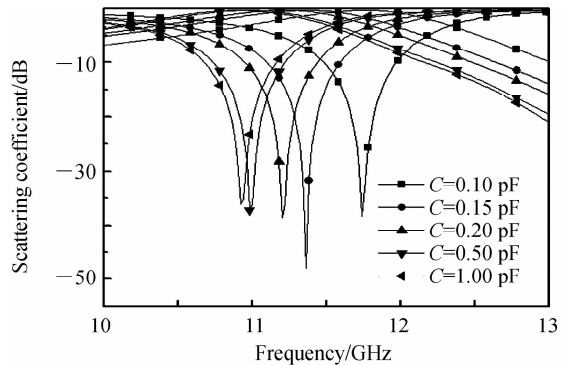


图 7 可调超材料滤波器散射参数的仿真结果
Fig. 7 Simulation results of scattering coefficient of tunable metamaterial filter

得基于超材料结构的可调滤波器散射参数的仿真曲线如图 7. 由图可知, 随着变容二极管电容值 C 的逐渐增大, 滤波器的工作频段向低频偏移. 当变容二极管电容值从 0.1 pF 增大到 1.0 pF 时, 在 X 频段中心频率从 11.7 GHz 逐渐减小到 11.0 GHz , 工作带宽为 11.0% ($10.9 \sim 12.0 \text{ GHz}$), 且在连续可调过程中, 通带内的回波损耗最小值为 32 dB , 插入损耗最大值为 0.38 dB .

2 研究结果

根据仿真设计值, 选取了 MACOM 公司的型号为 MAVR-000120-1411 的变容二极管, 利用导电胶贴装工艺, 实现二极管焊接, 滤波器采用微带线端口馈电. 滤波器采用罗杰斯 Rogers5880 作为介质基板, 相对介电常数为 2.2 , 损耗角正切值为 0.0009 , 厚度为 1.6 mm . 基于超材料的滤波器的具体尺寸参数为: $l=20 \text{ mm}$, $w=15 \text{ mm}$, $l_1=3.1 \text{ mm}$, $l_2=2.2 \text{ mm}$, $l_3=14.7 \text{ mm}$, $l_4=0.6 \text{ mm}$, $w_1=0.2 \text{ mm}$, $w_2=0.3 \text{ mm}$, $w_3=1.2 \text{ mm}$. 实物图如图 8.

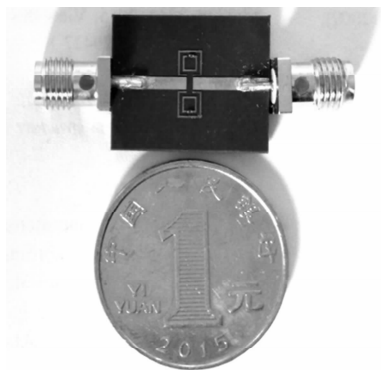


图 8 可调超材料滤波器加工实物图
Fig. 8 Photos of tunable metamaterial filter

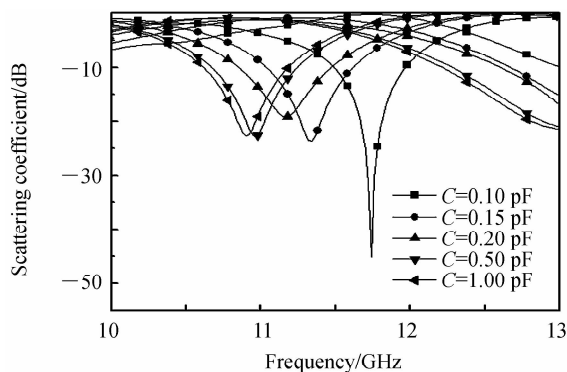


图 9 可调超材料滤波器散射参数的测试结果
Fig. 9 Measured results of scattering coefficient of tunable metamaterial filter

采用 Agilent 公司 N5230A 矢量网络分析仪对开口环结构的可调超材料滤波器的散射参数进行测试. 图 9 为可调超材料滤波器散射参数的测试曲线. 由图可知, 随着变容二极管电容值 C 的逐渐增大, 滤波器的工作频段向低频偏移. 当变容二极管电容值从 0.1 pF 增大到 1.0 pF 时, 在 X 频段中心频率从 11.75 GHz 逐渐减小到 10.90 GHz , 工作带宽为 12.0% ($10.75 \sim 11.95 \text{ GHz}$), 通带内的回波损耗最小值为 20 dB , 插入损耗最大值为 0.88 dB .

与仿真结果相比, 测试结果表明可调超材料滤波器的工作带宽由 11.0% 变为 12.0% , 回波损耗最小值由 32 dB 变为 20 dB , 插入损耗最大值由 0.38 dB 变为 0.88 dB . 滤波器的工作带宽变大、损耗变差, 这可能是由于加工误差等因素影响的缘故.

3 结论

本文设计了一种工作在 X 波段的基于超材料的频率可调滤波器, 滤波器的整体尺寸仅为 $15 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 具有小型化的特点. 通过在开口环缝隙处加载变容二极管, 实现超材料滤波器在工作波段内的连续可调. 研究表明: 超材料滤波器在 X 波段 ($10.9 \sim 12.0 \text{ GHz}$) 连续可调, 相对带宽为 11.0% , 通带内回波损耗最小值为 32 dB , 插入损耗最大值为 0.38 dB , 具有高集成度、宽频带、低损耗的特点.

参考文献

- [1] PANTOL L, STORNELLI V, LEUZZI G. Low-noise tunable filter design by means of active components [J]. *Electronics Letters*, 2016, **52**(1): 86-88.
 - [2] SAFARI M, SHAFAI C, SHAFAI L. X-band tunable frequency selective surface using MEMS capacitive loads [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, **63**(3): 1014-1021.
 - [3] GUO J, WU K, XIAO Y C, et al. Study on ultrawide tunable-range single-passband microwave photonic filter [J]. *Journal of Optoelectronics and Laser*, 2014, **25**(7): 1274-1278.
 - [4] CAO Ye, YANG Jing-peng, TONG Zheng-rong, et al. Ultra wideband tunable microwave photonic filter based on HB-PCF and fiber ring [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(12): 1206002.
- 曹晔, 杨菁芃, 童峥嵘, 等. 基于高双折射光子晶体光纤与光纤环的超宽带可调谐微波光子滤波器 [J]. 光子学报, 2016, 45(12): 1206002.

- 2016, **45**(12): 1206002.
- [5] HU Liang, WANG Zhi-gang, Xia Lei, *et al.* X-band tunable band-pass filter[J]. *Journal of Microwaves*, 2014, **11**(25):122-126.
胡亮,王志刚,夏雷,等. X波段可调谐带通滤波器[J]. *微波学报*, 2014, **11**(25):122-126.
- [6] YUAN Ming-hui, ZHAO Di. A tunable terahertz bandpass filter with a slit aperture flanked by symmetrically distributed parallel grooves on both sides [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3): 0323003.
袁明辉, 赵堤. 一种双面周期开槽型可调太赫兹带通滤波器[J]. *光子学报*, 2015, **44**(3): 0323003.
- [7] ZHAO Ya-juan, ZHANG Rong, WANG Dong-hong, *et al.* Differential dual-band slot antenna based on LHMs[J]. *Materials Review*, 2015, **26**(29): 167-170.
赵亚娟, 张榕, 王东红, 等. 基于左手材料的差分双频缝隙天线[J]. *材料导报*, 2015, **26**(29): 167-170.
- [8] LIU Hai-wen, ZHU Shuang-shuang, Wen Pin, *et al.* A flexible dual-band metamaterial based on hairpin split-ring resonators[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(3): 038101.
刘海文, 朱爽爽, 文品, 等. 基于发卡式开口谐振环的柔性双频带超材料 [J]. *物理学报*, 2015, **64**(3): 038101.
- [9] LIN Bao-qin, WEI Wei, DA Xin-yu, *et al.* A novel ultra-broad-band metamaterials absorber based on multilayer resistance films[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, **3**(42):607 - 610.
林宝勤, 魏伟, 达新宇, 等. 一种基于多层电阻膜的超宽带超材料吸波体 [J]. *电子学报*, 2014, **3**(42):607 - 610.
- [10] LU M, LI W, BROWN E R. Second-order bandpass terahertz filter achieved by multilayer complementary metamaterial structures[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(7):1071-1073.
- [11] RUDOLPH S M, GRBIC A. A broadband three-dimensionally isotropic negative-refractive-index medium[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, **60**(8):3661 - 3669.
- [12] FU W, HAN Y, LI J, *et al.* Polarization insensitive wide-angle triple-band metamaterial bandpass filter[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, **49**(28):285110.
- [13] KUNDU A, DAS S, MAITY S, *et al.* A tunable band-stop filter using a metamaterial structure and MEMS bridges on a silicon substrate[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2012, **22**(4):2303-2309.
- [14] ALI K G, CEYHUN K, AHMET O, *et al.* Metamaterial based dual-band bandpass filter design for WLAN/WIMAX applications[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2014, **10**(56): 2211-2214.
- [15] LIU Hai-wen, LEI Jiu-huai, ZHAN Xin, *et al.* Compact quad-band superconducting metamaterial filter based on split ring resonator[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(22): 2075-2084.
- [16] VAISHALI R, SEEMA A, ANIMESH B. Compact triple-band bandpass filter using split ring resonator [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2015, **5**(57):1222 - 1225.