

doi:10.3788/gzxb20184707.0723003

方环结构的宽频可调超材料滤波器

赵亚娟^{1,2}, 周必成^{1,2}, 张晗^{1,2}, 张婷^{1,2}, 李宝毅^{1,2}, 王东红^{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:采用微控制电路加载技术控制超材料的等效介电常数和等效磁导率在不同时间的空间分布形式, 实现空间滤波器中心频率的可调. 设计了一种方环缝隙结构超材料滤波器, 单元结构尺寸为 $18.5\text{ mm} \times 18.5\text{ mm}$, 通过在单元结构上加载变容二极管实现 X 波段内的连续可调. 当变容二极管电容值从 0.15 pF 增大到 0.70 pF 时, 仿真结果表明滤波器的中心频率从 11.8 GHz 逐渐减小到 10.5 GHz , 工作带宽为 16.3% ($10.2 \sim 12.0\text{ GHz}$), 通带内的回波损耗最小值为 22 dB , 插入损耗最大值为 0.6 dB . 测试结果表明滤波器的中心频率从 11.7 GHz 逐渐减小到 10.3 GHz , 工作带宽为 17.2% ($10.1 \sim 12.0\text{ GHz}$), 且通带内的回波损耗最小值为 25 dB , 插入损耗最大值为 0.5 dB .

关键词:超材料; 滤波器; 二极管; 宽频带; 频率可调

中图分类号: TN927+.23

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)07-0723003-6

Broadband Tunable Filter Based on Square Loop Metamaterial

ZHAO Ya-juan^{1,2}, ZHOU Bi-cheng^{1,2}, ZHANG Han^{1,2},
ZHANG Ting^{1,2}, LI Bao-yi^{1,2}, WANG Dong-hong^{1,2}

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

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

Abstract: The loading technology of microcontroller circuit was used to change the spatial distribution of relative permittivity and relative permeability in different time, the metamaterials spatial filter can be tuned in frequency. A square loop metamaterial filter was designed with unit structure size of $18.5\text{ mm} \times 18.5\text{ mm}$, which can be continuously tunable in the X band by loading varactor diode on the unit structure. When the varactor diode increases from 0.15 pF to 0.70 pF , the simulation results show that the center frequency of the filter is decreased from 11.8 GHz to 10.5 GHz , the bandwidth is 16.3% ($10.2 \sim 12.0\text{ GHz}$), and the return loss minimum is 22 dB , the insertion loss maximum is 0.6 dB . The measured results show that the center frequency of the filter is decreased from 11.7 GHz to 10.3 GHz , the bandwidth is 17.2% ($10.1 \sim 12.0\text{ GHz}$), and the return loss minimum is 25 dB , the insertion loss maximum is 0.5 dB .

Key words: Metamaterial; Filter; Diode; Broadband; Frequency tunable

OCIS Codes: 230.7408; 160.3918; 120.2440; 310.6845; 350.2450

0 引言

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被广泛应用于现代无线通信系统中^[1-3].滤波器在发射机中位于天线之前,起到后级滤波的作用,而在接收机中位于天线之后,为选频作用,

基金项目:中国电子科技集团公司山西省重点实验室专项资金(No.ZX15ZS391),国家自然科学基金(No.U1710115),装备发展部共用技术(No.33KJ1707YY034A),装备预研重点实验室基金(No.33KJ1707JJ039B),四川省军用技术再研发项目(No.zyf-2017-70)资助

第一作者:赵亚娟(1989-),女,工程师,硕士,主要研究方向为电磁防护超材料应用技术.Email:798710363@qq.com

收稿日期:2018-01-28; **录用日期:**2018-04-13

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

在无线通信系统中有重要作用.为了选择出所需频段的信号,抑制其它频段信号的干扰,射频前端电路中往往需要采用由多个不同中心频率的滤波器组合而成的滤波器组^[4-6].传统的调频滤波器采用滤波器组,通过选择开关来选择单个或者多个滤波器单元同时工作,以达到选择不同频段信号的目的.这类设计方法简单清晰,各个通带可以轻松实现完美的独立调节,可以对各个频段逐个搜索^[7-9].然而,传统调频滤波器通常体积大、难集成化,不符合当前收发机射频前端电路小型化、集成化的主流趋势.

目前,研究者倾向于采用单个尺寸较小的可调谐滤波器取代传统的滤波器组,更利于射频前端电路的多频段和集成化设计^[10-11].超材料又称为“人工电磁材料”、“异向介质”、“特异材料”等,是由周期性或非周期性人造微结构排列而成的人工复合材料,可用于电磁隐形衣、亚波长成像、传感器、高性能吸波材料、高性能滤波器^[12-15].秦超等^[16]设计的超材料结构滤波器中心频率为 7.8 GHz,相对带宽为 8%~9%.通过增大开口集总电容的值可以缩小器件体积,但同时也会降低无载 Q 值,综合考虑后一般可使电长度在 $\pi/4$ 左右. ALI K G 等^[17]设计了加载开口环结构的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 2.45 GHz 和 3.5 GHz. LIU H W 等^[18]提出了高温超导超材料滤波器,基于开口谐振环结构的超材料滤波器工作频率在 1.57 GHz/2.1 GHz/4.6 GHz/ 5.1 GHz,具有多频段和集成化的特点. VAISHALI R 等^[19]设计了一款对称结构的三频段带通超材料滤波器,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.

本文提出一种小型化的新型调频滤波器,单元结构尺寸为 $18.5 \text{ mm} \times 18.5 \text{ mm}$,采用方环缝隙型超材料滤波器结构,通过微控制电路加载技术,实现工作波段内的连续可调.

1 可调超材料滤波器设计

利用超材料相位补偿原理设计出符合工作频段要求的滤波器单元结构,实现高集成度滤波器结构设计,再在超材料结构单元上加载变容二极管,通过控制电路中的等效电容改变滤波器的工作频率.采用单个可调滤波器的射频前端电路占用的面积更小,有利于雷达收发机射频前端电路的多频段和集成化设计.

1.1 超材料滤波器单元结构设计

设计的环形结构的超材料滤波器的单元结构如图 1.黑色部分表示金属,白色部分表示介质基板.超材料滤波器结构包括三层,上层为方环缝隙结构,中间为介质基板,下层为金属条,上下层金属通过金属过孔 Via 导通.滤波器的工作频段为 X 射线波段,采用介电常数为 2.2、损耗角正切值为 0.02、厚度为 1.6 mm 的 Rogers 5880 介质基板.其中, l_1 表示单元结构的长度和宽度, l_2 表示方形金属环的长度和宽度, w_1 表示方形金属环垂直方向的宽度, w_2 表示方形金属环水平方向的宽度, l_3 表示内部金属贴片的长度, w_3 表示内部金属贴片的宽度, a 表示金属条的宽度, b 表示过孔的直径.采用三维高频电磁仿真软件(Computer Simulation Technology, CST)进行模拟.优化后的参数值为: $l_1=18.50 \text{ mm}$, $l_2=17.70 \text{ mm}$, $l_3=11.50 \text{ mm}$, $w_1=1.85 \text{ mm}$, $w_2=2.05 \text{ mm}$, $w_3=10.50 \text{ mm}$, $a=0.80 \text{ mm}$, $b=0.30 \text{ mm}$.

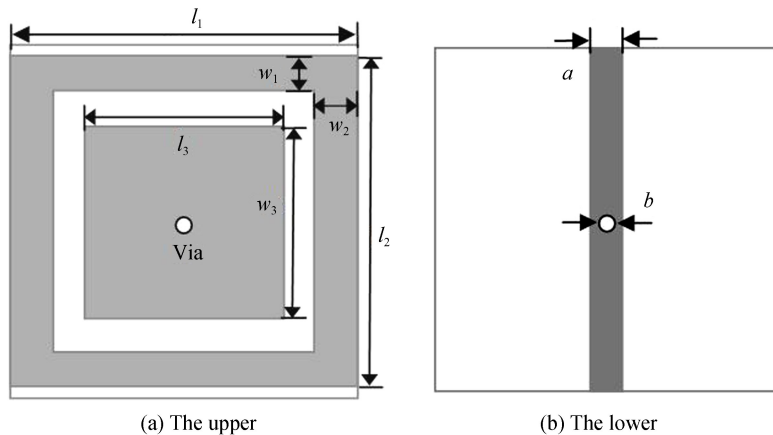


图 1 超材料滤波器的单元结构示意图

Fig.1 Unit structure diagram of metamaterial filter

利用 CST 对超材料滤波器单元结构参数进行优化,发现长度 w_1 和宽度 w_3 为影响滤波器特性的敏感参

数. ω_1 和 ω_3 对反射系数的影响曲线如图 2 和 3 所示. 由图 2 可知, 当 ω_1 逐渐增大, 工作频率逐渐向高频移动. 由图 3 可知, 当 ω_3 逐渐增大, 工作频率逐渐向低频移动. 因此, 通过改变敏感参数 ω_1 和 ω_3 的大小, 可以将超材料滤波器工作频率调节到需要的工作频段.

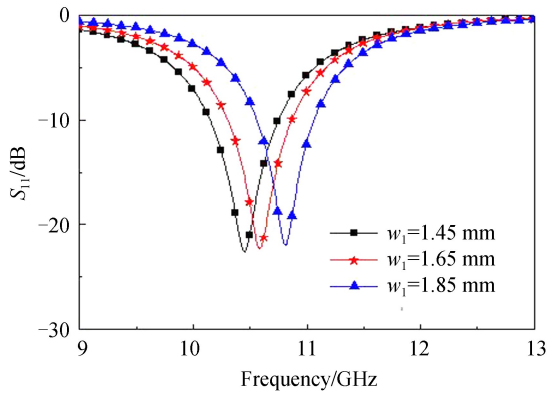


图 2 反射系数随 ω_1 的变化曲线
Fig.2 Scattering coefficient with different ω_1

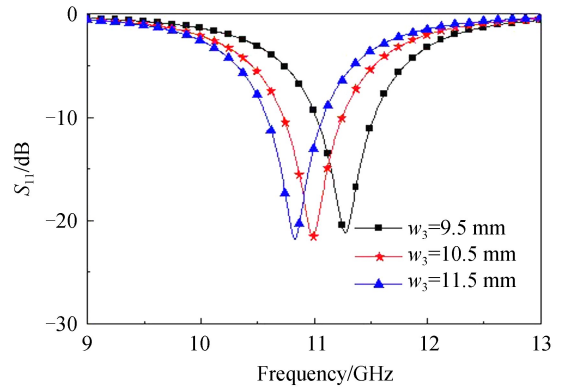


图 3 反射系数随 ω_3 的变化曲线
Fig.3 Scattering coefficient ω_3 with different ω_3

图 4 为入射角变化对超材料滤波器反射系数的影响曲线. 电磁波 0° 正入射时, 滤波器工作频率在 10.85 GHz, 工作带宽为 5.3% (10.54~11.12 GHz); 电磁波 10° 斜入射时, 滤波器工作频率在 10.82 GHz, 工作带宽为 5.0% (10.56~11.10 GHz); 电磁波 20° 正入射时, 滤波器工作频率在 10.78 GHz, 工作带宽为 4.0% (10.55~10.98 GHz). 因此, 入射角对超材料滤波器的工作频率和带宽均有影响. 随着入射角逐渐增大, 滤波器中心频率逐渐减小, 工作带宽逐渐变窄.

当电磁波正入射时, 环形结构的超材料滤波器的散射参数曲线如图 5 所示, 其中 S_{11} 表示反射系数, S_{21} 表示传输系数. 仿真结果表明, 滤波器的工作频段为 10.85 GHz (10.54~11.12 GHz), 相对带宽为 5.3%, 插入损耗为 0.6 dB, 回波损耗为 22 dB. 由于单频段滤波器带宽窄, 不能满足通信设备的需求, 通过添加变容二极管可调谐器件, 实现基于超材料的空间滤波器在 X 射线频段内连续可调.

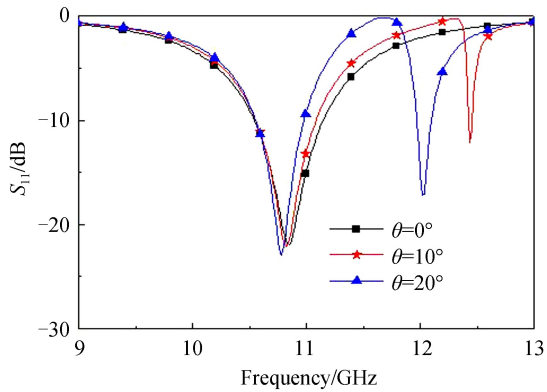


图 4 不同入射角对反射系数影响曲线
Fig.4 Reflection coefficient with different angle of incidence

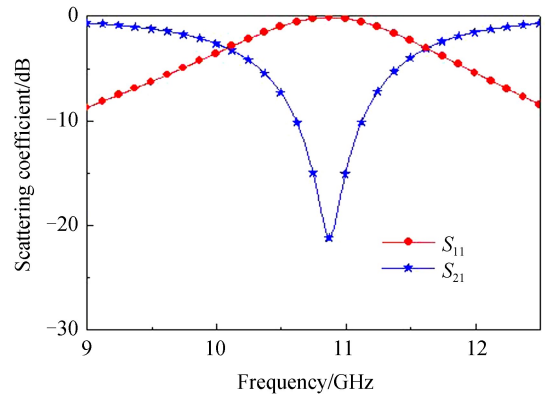


图 5 超材料滤波器的散射参数
Fig.5 Scattering coefficient for metamaterial filter

1.2 可调超材料滤波器结构设计

利用设计的单个方环结构调频滤波器, 按一定规律, 在水平和垂直方向上周期性延展, 实现空间滤波器结构设计, 与单个方环结构调频滤波器相比, 空间滤波器的滤波特性基本不受加载微带线的影响. 方环结构空间调频滤波器示意图如图 6. 其中, 图 6(a) 表示空间滤波器上层结构分布, 将上层周期单元向水平和垂直两个方向周期性延伸, 水平方向单元间隔为零, 垂直方向间隔为 0.8 mm, 整体呈并行结构排列. 图 6(b) 表示空间滤波器下层结构分布, 将下层金属条向水平方向周期性延伸, 间隔为 l_1 . 通过控制电路改变外加电压 U , 实现电容 C 的连续可调, 进而实现频率 f 连续可调.

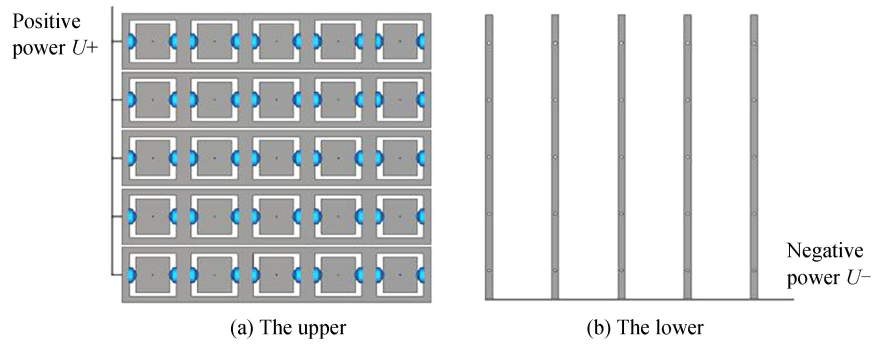


图 6 方环结构空间调频滤波器示意图

Fig.6 Structure of spatial tunable filter based on square loop

空间调频滤波器的工作频率随电容变化的仿真曲线如图 7 所示.其中,图 7(a)表示随电容 C 变化的反射系数曲线 S_{11} ,图 7(b)表示随电容 C 变化的传输系数曲线 S_{21} .由图 7(a)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 0.15 pF 增大到 0.70 pF 时,在 X 射线频段中心频率从 11.8 GHz 逐渐减小到 10.5 GHz,工作带宽为 16.3% (10.2~12.0 GHz),且在连续可调过程中,通带内的回波损耗最小值为 22 dB.由图 7(b)可知,在工作频段内,通带内的插入损耗最大值为 0.6 dB.

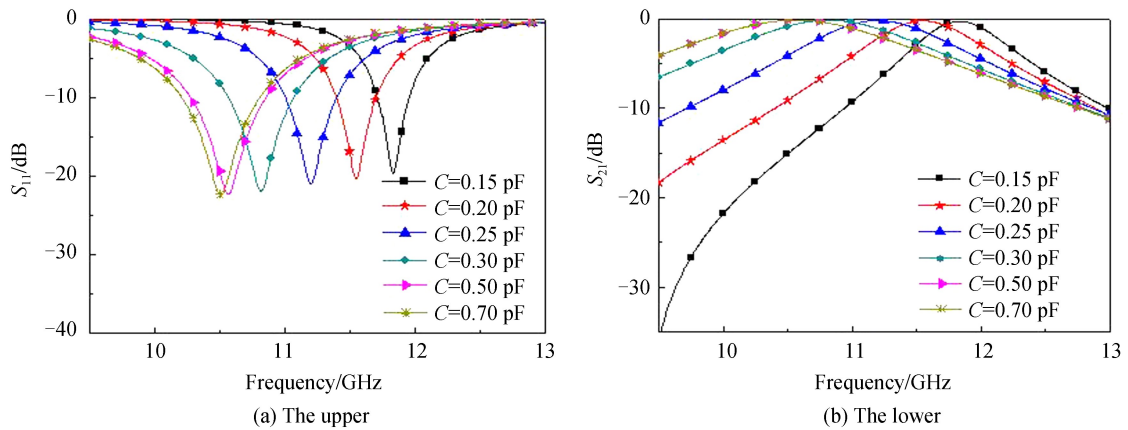


图 7 空间调频滤波器散射参数随电容变化仿真曲线

Fig.7 Simulation curve for scattering parameter of spatial tunable filter with capacitance

2 设计结果

为了验证仿真结果,设计并加工了方环结构的调频超材料滤波器.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,二极管的电容工作范围为 0.15~0.9 pF,与之对应的电压值范围为 1~15 V,利用导电胶贴装工艺实现调谐器件焊接,通过焊接导线对超材料滤波器进行馈电.滤波器

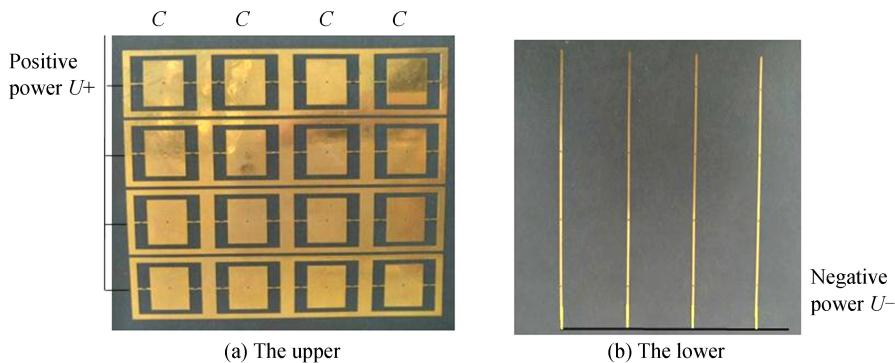


图 8 可调超材料滤波器加工实物图

Fig.8 Photos of spatial tunable filter based on metamaterial

采用厚度为 1.6 mm 的罗杰斯 Rogers 5880 介质基板,相对介电常数为 2.2,损耗角正切值为 0.0009.通过对双面覆铜的罗杰斯 Rogers 5880 介质基板进行激光刻蚀,加工制作出符合设计要求的超材料滤波器.实物如图 8.

测量装置示意图如图 9,包括矢量网络分析仪、吸波材料、发射天线和接收天线等.加工制作的可调超材料滤波器样品放置在发射和接收天线之间,材料离两天线距离相等,并且在材料的四周安放了吸波材料,用来防止绕射电磁波对实验测试准确性的影响.具体操作步骤为:1)选择两个 X 射线波段的线极化喇叭天线相对放置,两天线的高度一致,极化方向相同;2)将中间挖空的吸波材料放入两个喇叭天线中间,与两个喇叭天线距离相等,其中吸波材料中间挖空部分的尺寸和加工的多层相位调制结构材料尺寸大小相同;3)在不加多层相位调制结构材料的情况下校准矢量网络分析仪;4)将多层相位调制结构材料放置在吸波材料中间挖空的位置,将材料上所有单元的变容二极管加载同一偏置电压,测试反射系数和传输系数.

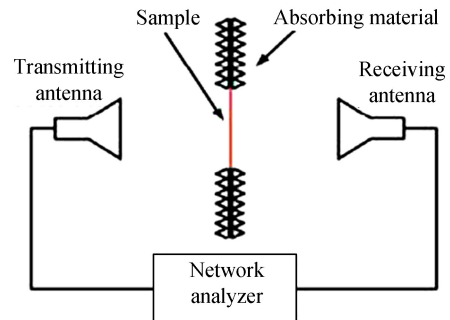


图 9 可调超材料滤波器的测量装置示意图
Fig.9 The test device of spatial tunable metamaterial filter

图 10 为滤波器散射参数测试曲线,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.由图可知,当变容二极管电容值从 0.15 pF 增大到 0.70 pF 时,在 X 射线频段中心频率从 11.7 GHz 逐渐减小到 10.3 GHz,工作带宽为 17.2%(10.1~12.0GHz),通带内的回波损耗最小值为 25 dB,插入损耗最大值为 0.5 dB.

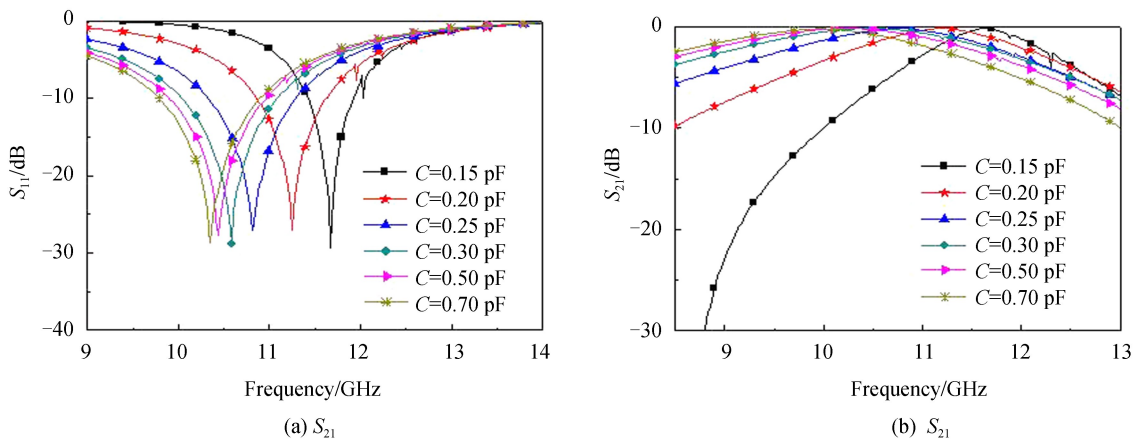


图 10 空间调频滤波器散射参数随电容变化测试曲线
Fig.10 Testing curve for scattering parameter of spatial tunable filter with capacitance

与仿真结果相比,测试结果表明超材料滤波器的工作带宽由 16.3%变为 17.2%,回波损耗最小值由 22 dB变为 25 dB,插入损耗最大值由 0.6 dB变为 0.5 dB.滤波器的工作带宽和损耗均改变,这可能是由于介质基板介电常数偏差、二极管贴装过程中的加工误差等因素影响的缘故.

3 结论

本文设计了一种方环缝隙结构超材料滤波器,通过在单元结构上加载变容二极管,实现 X 射线波段内的连续可调.研究表明:当变容二极管电容值从 0.15 pF 增大到 0.70 pF 时,滤波器的中心频率从 11.7 GHz 逐渐减小到 10.3 GHz,工作带宽为 17.2% (10.1~12.0 GHz),且通带内的回波损耗最小值为 25 dB,插入损耗最大值为 0.5 dB.该滤波器可替代传统滤波器组,解决传统滤波器组尺寸大、难以集成的难题.

参考文献

- [1] ZHAO Ya-juan, WANG Dong-hong, ZHANG Ze-kui, *et al.* A compact tunable filter based on metamaterial structure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(6): 0616005.

- 赵亚娟, 王东红, 张泽奎, 等. 基于超材料结构的小型化可调滤波器[J]. 光子学报, 2017, **46**(6): 0616005.
- [2] LI Yu-long, SONG Shu-xiang, CEN Ming-can, et al. Compact ultra-wideband microstrip bandpass filter designs[J]. *Electronic Components and Materials*, 2016, **1**(35): 57-60.
李玉龙, 宋树祥, 岑明灿, 等. 一个紧凑型超宽带微带带通滤波器[J]. 电子元件与材料, 2016, **1**(35): 57-60.
- [3] GORUR A K, KARPUZ C, OZEK A. Metamaterial based dual-band bandpass filter design for WLAN/WiMAX applications[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2014, **56**(10): 2211-2214.
- [4] FENG Meng-lu, YANG Shu-hui, CHEN Ying-chao. Design of a harmonic-suppressed bandpass filter using a defected ground structure[J]. *Electron Devices*, 2016, **1**(39): 67-71.
冯梦璐, 杨曙辉, 陈迎潮. 基于缺陷地抑制高阶谐波的带通滤波器设计[J]. 电子器件, 2016, **1**(39): 67-71.
- [5] ZHANG You-jun, LIN Jun. Microstrip bandpass filter based on folded dual-mode resonator structure[J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2015, **6**(37): 1057-1060.
张友俊, 林君. 基于折叠双模谐振器结构的微带带通滤波器[J]. 压电与声光, 2015, **6**(37): 1057-1060.
- [6] LIU Hai-wen, ZHU Shuang-shuang, WEN Pin, et al. A flexible dual-band metamaterial based on hairpin split-ring resonators[J]. *Acta Physics Sinica*, 2015, **3**(64): 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, **3**(64): 038101.
- [7] ZHAO Ya-juan, ZHOU Bi-cheng, ZHANG Ze-kui, et al. A compact tunable metamaterial filter based on split-ring resonators[J]. *Optoelectronics Letters*, 2017, **13**(2): 120-122.
赵亚娟, 周必成, 张泽奎, 等. 基于开口环结构的小型化可调超材料滤波器[J]. 光电子快报, 2017, **13**(2): 120-122.
- [8] GUO J, WU K, XIAO Y C, et al. Study on ultrawide tunable-range single-passband microwave photonic filter[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, **25**(7): 1274-1278.
- [9] CHAUDHARY G, JUNG Y, LIM J. Dual-band bandpass filter with independently tunable center frequencies and bandwidths[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, **61**(1): 107-116.
- [10] YOU Z G, LIN X Q, DENG L K. Study and design of electrically tunable filter[J]. *Communications Technology*, 2014, **44**(1): 162-167.
- [11] CHEN K, SONG C B, YANG J S. Design of tunable bandpass filter based on interdigital structure[J]. *Microelectronics*, 2012, **42**(3): 327-330.
- [12] ZHAO Ya-juan, JIANG Bo, LI Bao-yi, et al. Compact triple-band bandpass filter based on metamaterial[J]. *Optoelectronics Letters*, 2016, **12**(4): 273-275.
赵亚娟, 江波, 李宝毅, 等. 紧凑型超材料结构的三频段带通滤波器[J]. 光电子快报, 2016, **12**(4): 273-275.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] GE Dong-sen, XU Quan, WEI Ming-gui, et al. Broadband terahertz quarter wave plate based on meander-line dielectric metamaterials[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(9): 0921002.
葛栋森, 许全, 魏明贵, 等. 基于曲折线型介质超材料的宽带太赫兹四分之一波片[J]. 红外与激光工程, 2017, **46**(9): 0921002.
- [16] QIN Chao, TAN Yu, WANG Wen-jun, et al. Design on a new type of half-wavelength tunable filter[J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2014, **36**(3): 366-369.
秦超, 谭宇, 王文君, 等. 一种新型半波长可调滤波器设计[J]. 压电与声光, 2014, **36**(3): 366-369.
- [17] 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.
- [18] LIU H W, LEI J H, ZHAN X, et al. Compact quad-band superconducting metamaterial filter based on split ring resonator[J]. *Applied Physics Letters*, 2014: 222602.
- [19] 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.

Foundation item: The Key Laboratory Foundation of China Electronics Technology Group Corporation (No.ZX15ZS391), National Natural Science Foundation of China (No. U1710115), the Equipment Development Department Shares the Technology Fund (No. 33KJ1707YY034A), the Key Laboratory Foundation of Equipment Prediction (No.33KJ1707JJ039B) and the Sichuan Special Funds of Civil Military Integration of China (No.zyf-2017-70)

引用格式: ZHAO Ya-juan, ZHOU Bi-cheng, ZHANG Han, et al. Broadband Tunable Filter Based on Square Loop Metamaterial[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(7): 0723003

赵亚娟, 周必成, 张晗, 等. 方环结构的宽频可调超材料滤波器[J]. 光子学报, 2018, **47**(7): 0723003