

文章编号: 2095-4980(2023)06-0814-05

一种基于 CSRR_CRLH TL 的带通滤波器设计

邵建兴

(上海航天科工电器研究院有限公司, 上海 200331)

摘要: 提出一种基于探针加载的互补开口谐振环(CSRR)的复合左右手传输线(CRLH TL)结构。利用 CSRR+CRLH 结构的谐振特性, 并通过延长 CRLH 耦合缝隙的长度以及增加 CSRR 中短路探针的数量, 在引入传输零点的同时缩小了滤波器的尺寸。经过仿真优化, 实现了滤波器宽频带、高选择性和小型化设计。加工了基于该结构的带通滤波器样机, 样机整体尺寸为 30 mm × 15 mm × 1.35 mm。测试结果表明, 滤波器的中心频率及插入损耗分别为 6.6 GHz 和 0.65 dB, 3 dB 带宽为 9.3 GHz, 在无线通信、导航等微波系统中具有良好的应用前景。

关键词: 带通滤波器; 复合左右手传输线; 互补开口环; 短路探针; 耦合缝隙

中图分类号: TN713+.5

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023050

Design of bandpass filter based on the structure of CSRR_CRLH TL

SHAO Jianxing

(Shanghai Aerospace Science and Technology Electric Appliance Research Institute Co., Ltd, Shanghai 200331, China)

Abstract: A Composite Right/Left-Handed Transmission Line(CRLH TL) structure based on probe-loaded Complementary Split-Ring Resonator(CSRR) is proposed in this paper. Based on the resonant characteristic of CSRR and CRLH structure, the transmission zeros are introduced and the size of the filter is reduced by extending the length of CRLH coupling slot and by increasing the number of short-circuit probes in CSRR. The filter is designed with wide bandwidth, high selectivity and miniaturization. The prototype of the band-pass filter is fabricated. The overall size of the prototype is 30 mm × 15 mm × 1.35 mm. The test results show that the center frequency and insertion loss of the filter are 6.6 GHz and 0.65 dB respectively, and the 3 dB bandwidth of the filter is 9.3 GHz. The filter shows a good application value in microwave systems such as wireless communication and navigation.

Keywords: band-pass filter; Composite Right/Left-Handed Transmission Lines; Complementary Split-Ring Resonator; short-circuit probes; coupling gaps

随着微波毫米波技术的飞速发展以及加工制造技术水平的进步, 通信设备的小型化、集成化、多功能以及高可靠等指标要求也逐步提高。作为微波通信系统中的关键器件, 滤波器的高性能设计将直接提升通信系统链路的性能。滤波器的小型化设计可采用慢波开环结构、高介电常数材料、地面缺陷地结构等。采用慢波特性的缺陷地结构, 可以减小滤波器的体积, 扩宽滤波器的阻带带宽, 但其回波损耗指标较差; 采用高介电常数材料设计滤波器, 滤波器尺寸较小, 但介质材料的温度稳定性差, 损耗较大, 且滤波器性能对工艺的敏感性大^[1-4]。

自 Caloz 等提出复合左右手传输线(CRLH TL)结构以来, 由于其具有宽频带、低损耗、中度色散等诸多优点, 在耦合器、巴伦、滤波器、馈电网络等器件中得到推广应用^[5-8]。CRLH TL 在左手频率区可实现大的传播常数, 且传输线上的相位可通过独立调节 CRLH TL 的单元结构尺寸获得期望的目标值, 可用于滤波器的小型化设计^[6-11]。

本文利用 CSRR_CRLH TL 及短路探针的谐振特性, 采用多层结构设计了一款紧凑的新型带通滤波器。基于 CSRR 的 CRLH TL 原理, 对 CSRR 单元中短路探针数量及位置对滤波器性能的影响进行了分析, 并通过仿真进行了验证。最后, 对滤波器进行了加工测试分析。该带通滤波器具有体积小、宽频带、易集成等优点, 在对星载、机载等空间有严格要求的微波系统中具有良好的应用前景。

收稿日期: 2023-03-06; 修回日期: 2023-03-09

1 滤波器设计与分析

分布式CRLH TL是一种同时具有左手材料特性和右手材料特性的传输线结构。实际应用中,左手材料特性一般采用叉指电容和接地短截线电感实现。由于传输线的寄生参数效应,在其等效电路中会出现串联电感和并联电容,因此不存在理想的左手材料,而是以CRLH结构形式存在。当电磁波在CRLH结构中传播时,在某个频率范围内其传播特性会呈现“左手特性”,而在其他频率范围内则呈现“右手特性”^[6-8]。

基于CSRR的CRLH单元等效电路如图1所示^[12]。CSRR由 L_p 和 C_p 组成的并联对地谐振回路等效。受轴向时谐电场的激发,CSRR在电谐振频率附近产生负介电常数,而缝隙电容和线电感在磁谐振频率附近产生负磁导率。

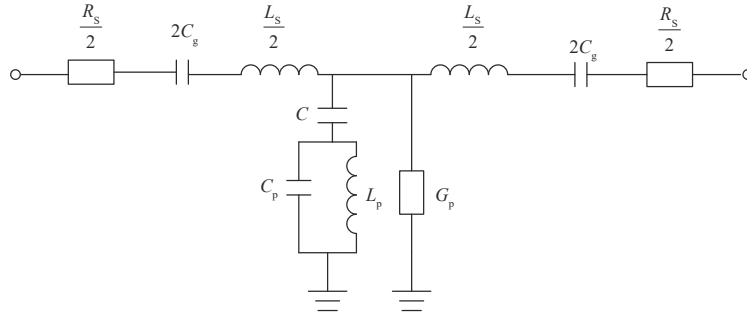


Fig.1 Equivalent circuit of the CSRR-CRLH unit
图1 CSRR-CRLH单元等效电路

从等效电路出发,对于任意CRLH TL等效电路,串联支路谐振角频率 ω_{sc} 、并联支路谐振角频率 ω_{sh} 和并联谐振腔谐振角频率 ω_p 为:

$$\begin{cases} \omega_{sc} = 1/\sqrt{L_s C_g} \\ \omega_{sh} = 1/\sqrt{L_p (C + C_p)} \\ \omega_p = 1/\sqrt{L_p C_p} \end{cases} \quad (1)$$

式中: L_s 为传输线电感; C_g 为缝隙电容; C 为传输线电容以及传输线与CSRR的边缘电容效应之和。

$\omega_{sc} = 2\pi f_{sc}$ 和 $\omega_p = 2\pi f_p$ 分别对应等效磁导率 μ'_{eff} 及等效相对介电常数 ϵ'_{eff} 为零时的角频率; $\omega_{sh} = 2\pi f_{sh}$ 对应CRLH TL左手通带的低端传输零点角频率。当 $\omega_{sc} = \omega_p$ 时,CRLH TL工作于平衡态,左手通带与右手通带无缝过渡^[12]。

CRLH TL传输线色散和损耗随频率而变化,其色散曲线是非线性的,利用这一特性可以设计多种突破常规性能微波器件^[8]。

对于传统的CRLH结构,其串联电容和并联电感通常由平面电容和接地通孔实现,串联电感和并联电容则由传输线的寄生效应产生。在对传统CRLH结构分析研究的基础上,本文提出一种基于探针加载的新型CSRR_CRLH TL滤波器结构。CSRR_CRLH单元结构由上层容性金属贴片缝隙、中间层耦合金属贴片、接地层CSRR、连接CSRR与中间层耦合金属贴片的短路探针、接地孔以及介质基板组成,如图2所示。为增强上层和中间层2块容性金属贴片的缝隙耦合电容,将传统直线缝隙设计为弯折缝隙,从而降低串联支路的谐振频率,实现滤波器的小型化设计。

为实现滤波器的宽带阻抗匹配,上层金属导带采用阶梯阻抗线结构。中间层贴片与上层的金属贴片以及探针加载的底层CSRR实现有效的电激励和左手特性。中间层贴片与上层低阻抗贴片形成的平板电容极大地增大了左手电容,从而显著降低串联支路谐振角频率,并增强单元的左手特性,使左手频段与右手频段之间的阻带间隙减小甚至消失。连接CSRR与中间层容性金属贴片中的短路探针等效为电感 L_p ,短路探针数量的变化将引起 L_p 值的变化,起到调节滤波器工作性能的作用。

滤波器的介质层材料为RA300(相对介电常数为2.94,介质损耗角正切为0.001 1)。当连接CSRR与中间层的短路探针数量为2时,通过ANSYS HFSS对滤波器进行仿真优化,其具体结构尺寸参数设计如表1所示,其性能如图3所示。从图3可见,滤波器的中心频率及其插入损耗分别为3.7 GHz和0.46 dB,3 dB带宽为3.2 GHz,滤波器有2个传输零点,分别为1.75 GHz和6.1 GHz。在0.05 ~ 1.9 GHz的阻带范围内的带外抑制优于20 dB。此外,仿真分析表明,当连接CSRR与中间层容性金属贴片中的短路探针位置发生变化时,滤波器的整体性能基本保持不变,其主要原因是探针位置的变化并未导致其等效参数 L_p 值的显著变化。

此外,为分析CSRR中短路探针数量对滤波器性能的影响,对连接CSRR与中间层容性金属贴片中的短路探

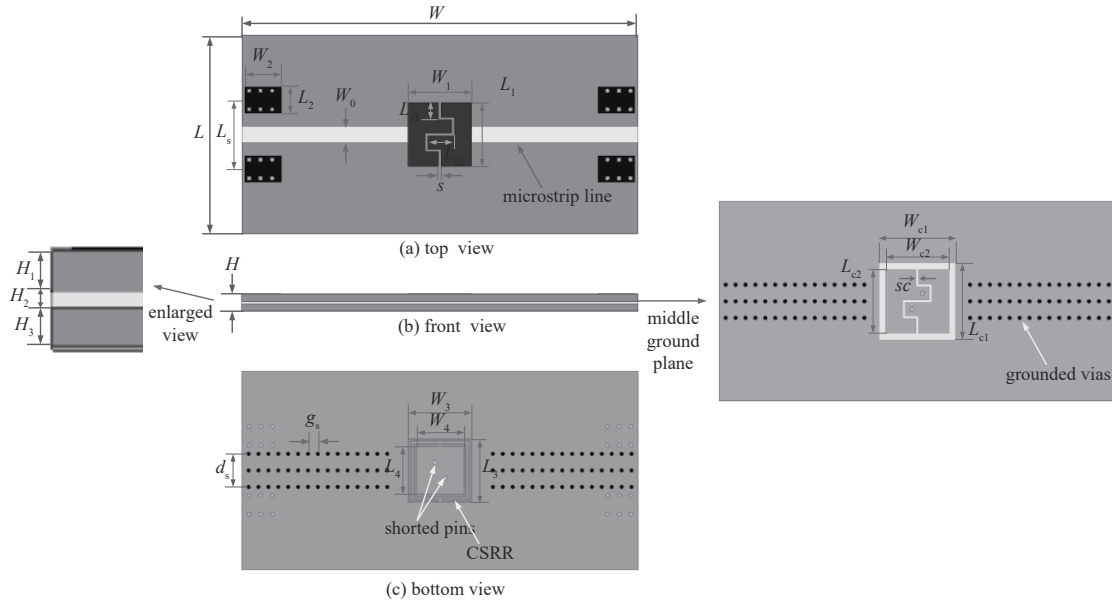


Fig.2 Structure diagram of the novel band-pass filter
图2 新型带通滤波器结构图

表1 滤波器结构参数(单位:mm)

Table1 Dimensions of the filter shown in Fig.2(unit:mm)

W	W_0	W_1	W_2	W_3	W_4	W_{c1}	W_{c2}	L	L_1	L_2	L_3	L_4
30	1.2	4.8	3	4.9	3.6	7.3	4.8	15	4.8	2	4.9	3.6
L_{c1}	L_{c2}	L_s	L_{s1}	L_{s2}	H	H_1	H_2	H_3	g_s	d_s	s	s_c
7.3	4.8	5.2	1.3	2.2	1.35	0.508	0.2	0.508	0.75	2.5	0.2	0.2

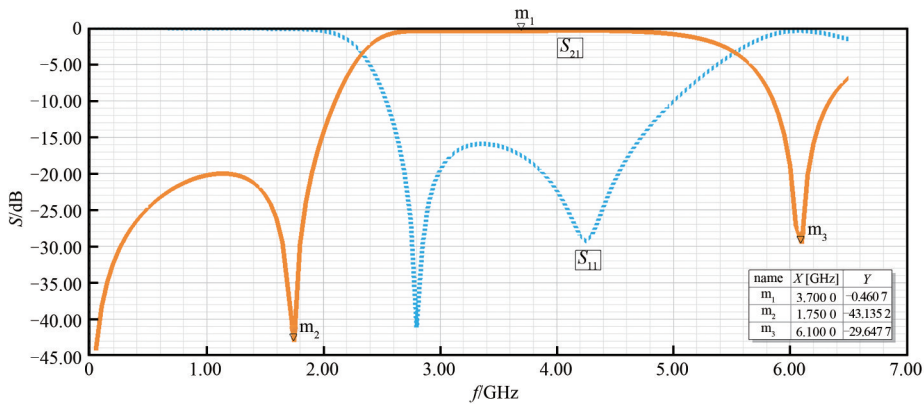


Fig.3 Simulation results of the filter
图3 滤波器仿真结果

针数量分别为2、4、6和10情况下的滤波器进行仿真对比分析，其性能如图4所示。

从图4可见，随着短路探针的增加，滤波器低频端的传输零点基本保持不变，而高频端的传输零点由6.1 GHz逐渐后移至12.25 GHz，滤波器的带宽逐渐扩展，3 dB阻抗带宽由初始的3.2 GHz增加到9.3 GHz。

2 滤波器的加工及测试

为进一步验证理论分析与仿真结果的正确性，对所设计的滤波器进行了实物加工并测试。滤波器采用PCB印制电路板加工工艺，基板材料选择睿龙RA300板材(相对介电常数为2.94，介质损耗角正切为0.001 1)，滤波器的短路探针为10个。滤波器实物如图5所示，其整体尺寸为30 mm×15 mm×1.35 mm。

对加工的滤波器进行测试，测试结果如图6所示。测试结果表明，滤波器的中心频率及其对应的插入损耗分别为6.6 GHz和0.65 dB，3 dB带宽为9.3 GHz，在0.05~1.65 GHz的阻带范围内的带外抑制优于20 dB。测试结果与仿真结果基本吻合，测试与仿真的差异可能是加工公差以及焊接工艺所产生。

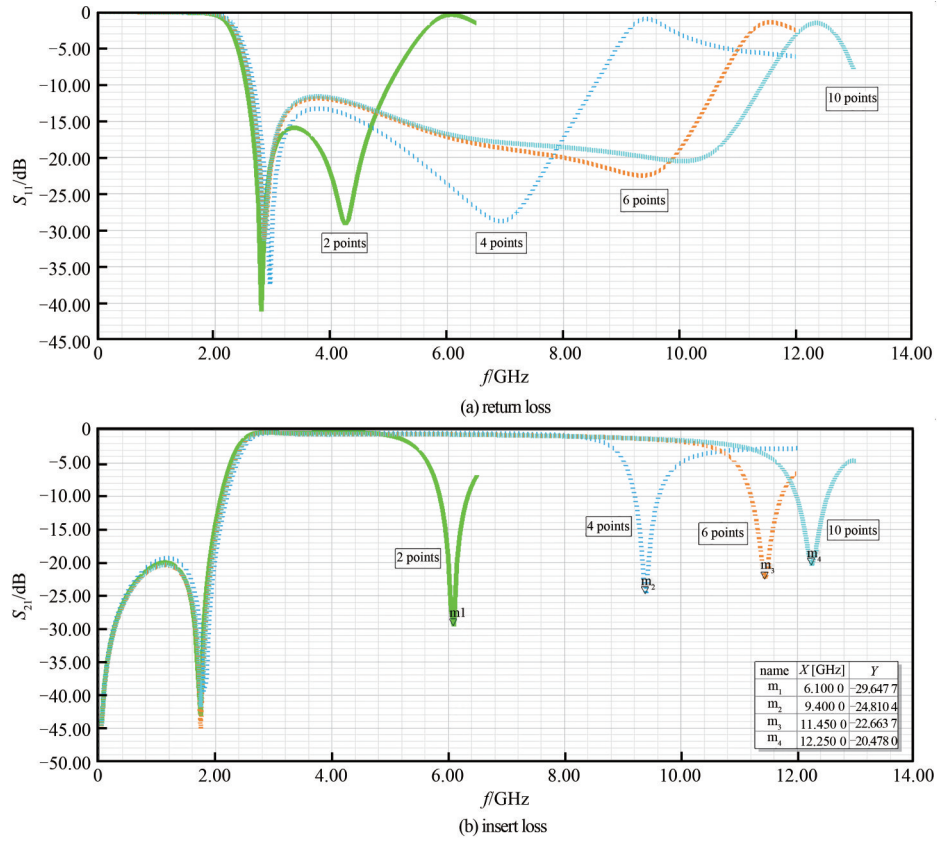


Fig.4 Performance comparison of the filter with different numbers of probes
图 4 滤波器在不同探针数量下的性能对比

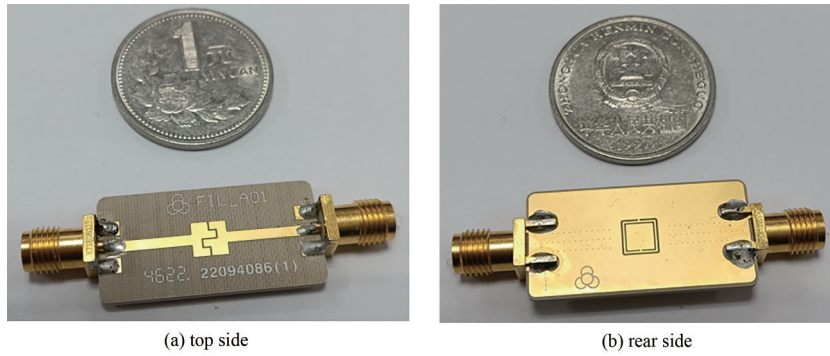


Fig.5 The pictures of the filter
图 5 滤波器实物图

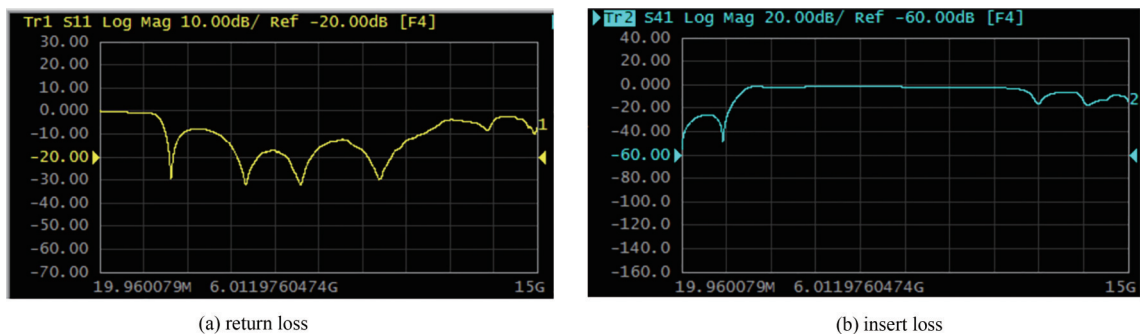


Fig.6 Test results of the filter
图 6 滤波器的测试结果

3 结论

本文提出一种基于短路探针加载的 CRSS_CRLH TL 的谐振单元结构, 并据此结构设计了一款带通滤波器。通过对 CRSS_CRLH 原理的分析, 结合 ANSYS HFSS 对滤波器进行了仿真优化, 详细分析了不同短路探针数量对滤波器的性能影响。最后, 对滤波器进行了实物加工及测试。测试结果表明, 该滤波器具有结构紧凑, 损耗低, 易于集成等优点, 在小型宽带微波组件中具有良好的工程应用前景。

参考文献:

- [1] GAO X, FENG W J, CHE W Q. Compact ultra-wideband bandpass filter with improved upper stopband using open/shorted stubs[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017,27(2):123-125.
- [2] XIA X L, XU C, CHEN F J, et al. Compact UWB bandpass filter with sharp roll-off using APCL structure[J]. Electronics Letters, 2018,54(13):837-839.
- [3] LI M K, CHEN C, CHEN W D. Miniaturized dual-band filter using dual-capacitively loaded SIW cavities[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017,27(4):344-346.
- [4] 张威, 叶龙芳, 许雄, 等. X 波段阶梯阻抗微带带通滤波器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(4):668-671. (ZHANG Wei, YE Longfang, XU Xiong, et al. Design of multi-mode microstrip bandpass filter using stepped impedance resonator at X-band[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(4):668-671.)
- [5] 胡善文, 胡云清, 郑海宇, 等. 采用复合左右手结构的微型基片集成波导滤波器设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019,53(12):2431-2436. (HU Shanwen, HU Yunqing, ZHENG Haiyu, et al. Design of compact substrate integrated waveguide filter based on composite right/left-handed structure[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2019,53(12):2431-2436.)
- [6] 赵国华, 李振华, 粮华清. 新型 CRLH 传输线带通滤波器设计[J]. 电子元件与材料, 2015,34(5):42-45. (ZHAO Guohua, LI Zhenhua, LANG Huaqing. Novel design of CRLH transmission line bandpass filter[J]. Electronic Components and Materials, 2015,34(5):42-45.)
- [7] 李亭亭, 丁德渝, 李国新, 等. 复合左右手传输线的小型超宽带滤波器设计[J]. 电子元件与材料, 2013,32(9):48-50. (LI Tingting, DING Deyu, LI Guoxin, et al. Design of compact ultra-wide-band filter based on composite right/left handed transmission line[J]. Electronic Components and Materials, 2013,32(9):48-50.)
- [8] 王政平, 韩振豫. 基于新型 SCRLH TL 结构的超宽带滤波器设计[J]. 光学与光电技术, 2012,10(3):81-84. (WANG Zhengping, HAN Zhenyu. Ultra wideband filter design based on novel SCRLH Transmission Line structure[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2012,10(3):81-84.)
- [9] 尹波, 蔡旭, 张帅. 基于 CSRR-SIW 结构的复合左右手带通滤波器小型化设计[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2018,30(2):243-248. (YIN Bo, CAI Xu, ZHANG Shuai. Design of compact CRLH bandpass filter based on structure of CSRR-SIW[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2018,30(2):243-248.)
- [10] 潘武, 李国新, 李亭亭, 等. 基于 CRLH TL 结构的带通滤波器设计与研究[J]. 压电与声光, 2013,35(6):893-895, 898. (PAN Wu, LI Guoxin, LI Tingting, et al. Compact bandpass filter based on CRLH TL structure[J]. Piezoelectrics & Acousto-optic, 2013,35(6):893-895, 898.)
- [11] 赵国华, 李振华, 崔炳喆, 等. 新型 CRLH 零阶谐振带通滤波器设计[J]. 航空兵器, 2015(5):52-55. (ZHAO Guohua, LI Zhenhua, CUI Bingzhe, et al. Novel design of CRLH zero-order resonator band-pass filter[J]. Aero Weapon, 2015(5):52-55.)
- [12] 王光明, 许河秀, 梁建刚, 等. 紧凑型异向介质——机理、设计与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2015. (WANG Guangming, XU Hexiu, LIANG Jiangang, et al. Compact heterotropic medium—mechanisms, design and applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.)

作者简介:

邵建兴(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事微波毫米波器件及组件、信号完整性技术研究, email:sjxccxz@163.com.