

基于分形 CRLH-TL 加载短截线超宽带滤波器设计

张小宽,袁俊超,吴盛源

(空军工程大学 防空反导学院,陕西 西安 710051)

摘要:传统基于微带缝隙和逆开环谐振器(CSRRs)的复合左右手传输线的带宽较窄、通带内反射损耗较大,限制了其应用。因此,该文采用了 Minkowski 分形的微带缝隙代替传统微带缝隙,有效地展宽了带宽,并通过在微带缝隙两侧加载短截线的方式进一步增加了带宽并改善了高频端带外抑制特性。分析了结构的尺寸参数对其传输特性的影响,并根据 S 参数计算了色散曲线、提出了等效电路模型。最后,运用所提出的方法设计了一款超宽带带通滤波器。该滤波器仅采用一个复合左右手(CRLH)结构单元,获得了超带宽 2.1~9 GHz(相对带宽 124.3%)和较小的带内反射损耗(小于 0.8 dB),同时滤波器在 9.5~12 GHz 的阻带范围内传输抑制大于 20 dB。测量结果、仿真结果与等效电路结果基本吻合,验证了该设计方法的有效性。

关键词:复合左右手传输线;Minkowski 分形曲线;短截线;超宽带;带通滤波器

中图分类号:TN713

文献标识码:A

Design of UWB Filter With Steep Rejection Slope Based on Fractal-shaped CRHL-TL

ZHANG Xiaokuan, YUAN Junchao, WU Shengyuan

(Air and Missile Defense College of Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: The conventional CRHL TL based on the microstrip slot and reverse open loop resonator has limits on its application because of the narrow bandwidth and large reflection loss in pass band. Aiming at above-mentioned problems, the conventional microstrip slot is replaced by Minkowski fractal microstrip slot to expand the bandwidth. Loading stub on both sides of the microstrip can also increase the bandwidth and improve the out-of-side rejection of high frequency end. The impact of size parameters of structure on the transmission characteristics is analyzed in this paper. The dispersion curve is calculated according to parameter S . Then, the equivalent circuit model is proposed. Finally, the band-pass filter with ultra-wideband is designed by the proposed method. The band-pass filter uses only one CRLH structural unit and the ultra-wideband of 2.1~9 GHz (relative bandwidth 124.3%) has been obtained. The reflection loss is smaller than 0.8 dB. At the same time, the transmission suppression of filter is larger than 20 dB at the stopband range of 9.5~12 GHz. The results of measurement and simulation are basically consistent with the result of equivalent circuit, which verifies the validity of the design method.

Key words: CRHL TL; Minkowski fractal curve; stub; ultra-wideband; band-pass filter

0 引言

近年来,提出了各种结构类型的超宽带(UWB)带通滤波器(BPF)^[1-9]。将高通滤波器与低通滤波器级联实现的超宽带滤波器^[1]具有很好的带外抑制能力,但尺寸较大。目前针对复合左右手(CRLH)TL结构在微波电路设计中的应用已取得大量成果,很多以前较难实现的特性(如多频化、小型化、宽

频带及低损耗等),采用平面 CRLH TL 结构后易实现。文献[2]提出一种基于新型 CRLH 结构的小型超宽带带通滤波器。文献[3]分析了一款基于互补谐振环(CSRR)的左手传输带通滤波器各参数特性,但带内反射损耗较大,高端抑制不理想^[10]。文献[4]设计了基于菱形逆开环谐振器(CSRRs)和基于 Koch 分形 CSRRs 的带通滤波器,频率选择性较好,但是带宽较窄。文献[5]报道了将 Sierpinski 分

收稿日期:2016-09-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61372033);电磁散射辐射重点实验室创新基金资助项目(STES2014-2)

作者简介:张小宽(1973-),男,陕西扶风人,教授,硕士生导师,博士,主要从事电磁场与微波工程应用的研究。

形结构与 CSRRs 相结合的办法,旨在降低传输零点的谐振频率而实现小型化,但其通带内插入损耗过大,带宽较窄,不能直接应用于微波电路的设计。文献[6]介绍了传统短截线实现超宽带的原理并作了改进,使得该滤波器的通带在高频端锐截止。文献[7]提出了一种基于 Minkowski 分形互补开口环谐振器(CSRRs)的电小平衡复合左右手传输线,与基于传统 CSRRs 加载的 CRLH TL 相比,所提出的 CRLH TL 带宽明显展宽,具有更低的工作频率。展现了其在超宽带、小型化器件应用中的广阔前景。

基于 CSRRs 加载的 CRLH TL 有许多优点,但其带宽较窄,尺寸较大,从而影响了其在现代无线通信中的应用。受到文献[3-7]的启发,为了克服上述设计的不足,本文首先采用 Minkowski 分形的微带缝隙代替传统微带缝隙,有效地展宽了带宽,并通过在微带缝隙两侧加载短截线的方式进一步增加带宽并改善高频端带外抑制特性;然后,分析了结构的尺寸参数对其传输特性的影响,并根据 S 参数计算色散曲线、提出了等效电路模型;最后,运用所提出的方法设计了一款超宽带带通滤波器。

1 改进型复合左右手传输线

1.1 Minkowski 分形曲线

Minkowski 分形曲线的构造过程如下:

取一段长度为 1 的直线(Minkowski 分形曲线的初始元,见图 1 中分形次数 $n=0$),将其三等分,保留两端线段,将中间的一段改成高为 $a/3$,底为 $1/3$ 的 U 型折线($a/3$ 为凹入宽度, $0 < a < 1$),如图 1 中 $n=1$ 的操作;再将 5 条线段进行同样的操作,如图 1 中 $n=2$ 的操作。重复上述操作直到无穷,即可得到理想的 Minkowski 分形曲线。

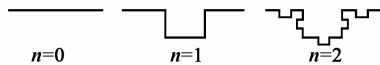


图 1 Minkowski 分形曲线

1.2 改进型复合左右手结构单元分析

在左手材料的最初研究中,负的磁导率是由周期排列的开环谐振器(SRR)产生的。SRR 可以在其谐振频率周围产生等效负磁导率,而金属导线可以在其等离子体频率下产生等效负介电常数,因此将 SRR 与金属导线结合并周期排列,就可以构造出左手传输带。由于 CSRR 与 SRR 之间具有对偶性,因此,CSRR 可以在其谐振频率周围产生等效负介电常数,那么可以想象,如果将可以产生负磁导率

效应的材料与 CSRR 相结合,应该也会产生出左手传输通带^[3]。

本文设计选择文献[3]中的结构作为基础对象,但本文改进结构的正面采用对称 Minkowski 分形结构,背面用方形开口谐振环代替文献中原有的结构,如图 2 所示。

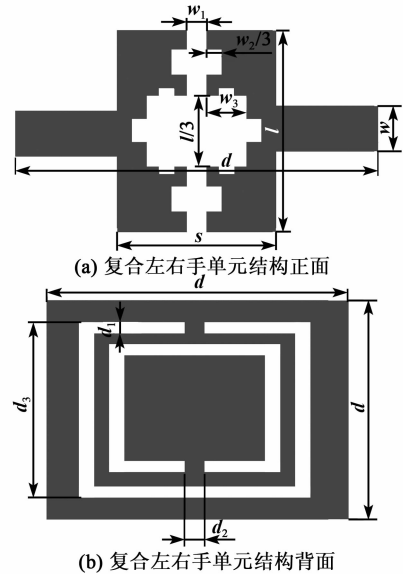
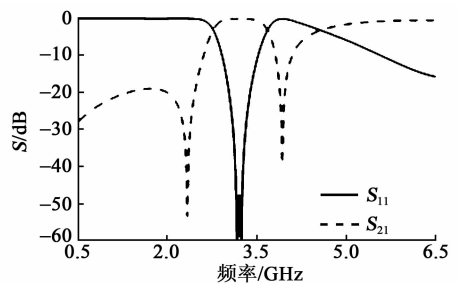


图 2 基于分形复合左右手单元结构图

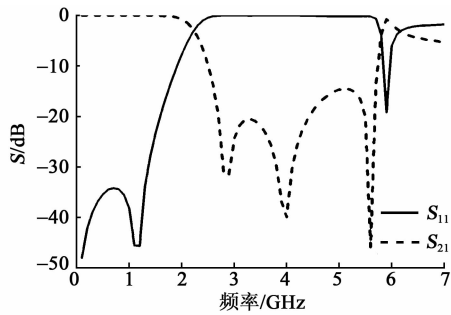
表 1 为该结构单元的相关参数值。在软件 HFSS 中进行建模仿真,图 3 为文献[3]中原始结构和新单元结构的 S 参数仿真结果。由图可知,原始结构有一个从 2.78~3.30 GHz 的通带,相对带宽为 17.1%;而本文改进的结构有一个从 2.18~5.88 GHz 的通带,相对带宽达到 45.9%、与原始结构相比,有效地展宽了带宽,但仍存在同样的缺陷,即带内差损较大,高端抑制不够理想。

表 1 复合左右手单元结构的相关参数

d/mm	d_1/mm	d_2/mm	d_3/mm	l/mm
9.6	0.6	0.5	6	2.7
s/mm	w/mm	w_1/mm	w_2/mm	
2.8	0.64	0.5	0.6	



(a) 文献[3]中 S 参数结果



(b) 本文改进结构后 S 参数结果

图 3 结构改进后与文献 S 参数对比图

为了得到更好的带外抑制,采取文献[6]加载短截线的办法来改善频率高端衰减,在结构的正面加载对称的高阻抗性开路短截线,如图 4 所示。

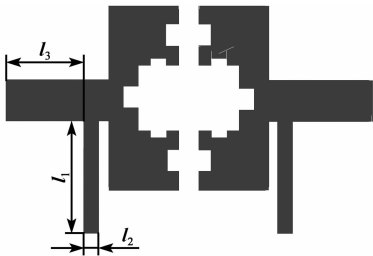


图 4 加载短截线后的结构

短截线长度 $l_1=3.3$ mm,宽度 $l_2=0.3$ mm,短截线距离边沿的距离 $l_3=3$ mm。图 5 为加载短截线后滤波器的 S 参数仿真结果。由图可知,带宽进一步展宽,且高频端带外抑制变好,但在高频端 S 参数曲线仍有谐振存在,可以通过调节短截线的长度、宽度以及与端口的距离来消除谐振。

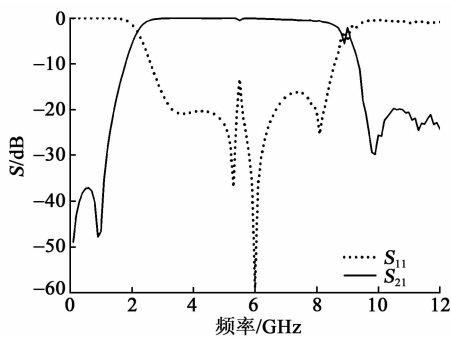


图 5 加载短截线后的 S 参数结果

提取结构的 S 参数,利用色散关系式

$$|\beta(\omega)d| = \left| \operatorname{Re} \left[\arccos \left(\frac{1 - S_{11}S_{22} + S_{21}S_{12}}{2S_{21}} \right) \right] \right| \quad (1)$$

来描述该结构单元的色散曲线如图 6 所示。式(1)中, d 为单元结构的长度, β 为相移, ω 为工作频率。

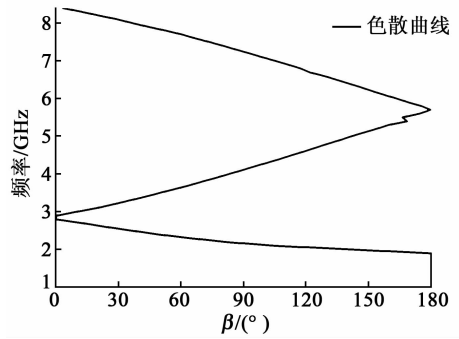


图 6 结构色散曲线

由图 6 可知,该结构为复合左右手结构,在低频 2~2.9 GHz 呈现左手特性,2.9 GHz 以上显现右手特性,2.9 GHz 为该结构的平衡点,此时性能实现从左手到右手的过渡。

1.3 传输特性与各参数间的关系

本文所讨论与结构有关的主要参数有 l_1 、 l_2 及 l_3 。为研究各参数对滤波器带宽及高频端截止的影响,通过固定其中两个而改变另一个参数值的方法进行仿真来观察频率特性的变化。

首先,仿真给出一组初始值: $l=2.7$ mm, $s=2.8$ mm, $l_1=3.2$ mm, $l_2=0.3$ mm, $l_3=3$ mm。保持其他参数不变,依次改变参数 l_1 ,得到结构单元的 S 参数随 l_1 变化的曲线如图 7 所示。当 $l_1=2$ mm 时,通带在 6 GHz 处有陷波的趋势,当 l_1 增加到 3.2 mm 时,陷波消失,且带宽增加,而当 l_1 继续增加到 4.4 mm 时,在 5 GHz 处又出现陷波,带宽变窄。由此可见,参数 l_1 主要影响带宽及通带中小范围内的陷波。

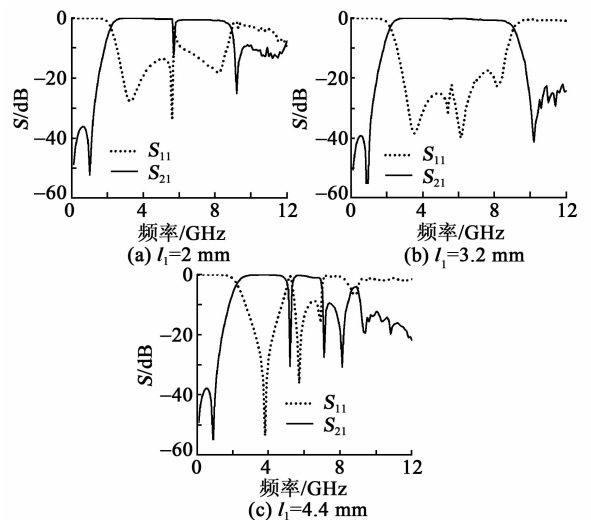


图 7 l_1 变化对 S 参数的影响

保持其他参数不变,改变参数 l_2 ,得到结构单元的 S 参数随 l_2 变化的曲线如图8所示。在2~9 GHz的范围内 S 参数有相似的变化趋势,均有较好的带通特性,由图可知,参数 l_2 对通带带宽影响不大,主要影响通带内 S_{11} 及高端截止频率处 S_{21} 的变化。

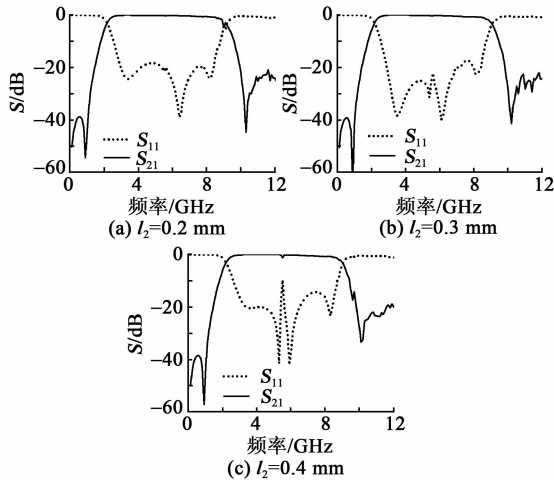


图8 l_2 变化对 S 参数的影响

保持其他参数不变,改变参数 l_3 ,得到结构单元的 S 参数随 l_3 变化的曲线如图9所示。随着 l_3 的增加,结构单元带宽有增加的趋势,且对低频端的影响不大,主要影响频率高端的带外抑制性能。

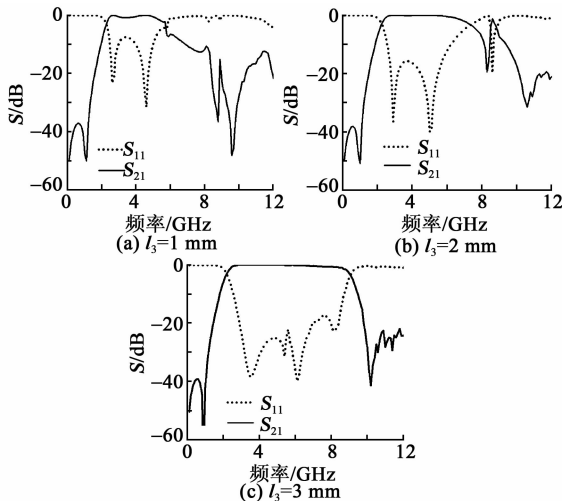


图9 l_3 变化对 S 参数的影响

1.4 等效电路提取

由于加载短截线与接地板之间形成电容效应,相当于在原结构中引入接地电容,于是在文献[4]已经正确提取等效电路的基础上,提取改进后结构的等效电路如图10所示。利用微波电路仿真软件Serenade 8.7中的优化拟合工具,可得等效电路模

型中的各个参数,分别近似为: $L_1=1.03$ nH, $L_2=1.35$ nH, $L_3=0.71$ nH, $C_1=1.62$ pF, $C_2=0.55$ pF, $C_3=10$ pF。HFSS仿真与Serenade等效电路模型结果如图11所示。

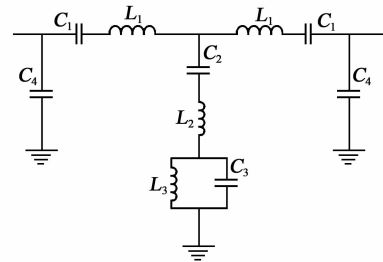


图10 结构等效电路

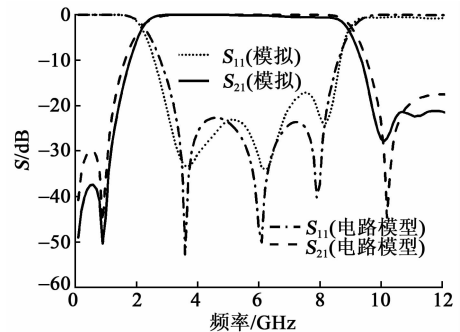


图11 HFSS仿真与等效电路模型结果

2 基于Minkowski分形超宽带滤波器设计与测量

一般来说,分形结构的物体都具有自相似性和空间填充性两大特点,因此,将分形结构运用到滤波器的设计中,能够达到抑制高次谐波,产生传输零点,展宽带宽或减小结构尺寸等,从而提升滤波器的性能。

本文设计的超宽带滤波器电路结构如图4所示。通过Ansoft HFSS10软件优化,滤波器尺寸最后选择 $d=9.6$ mm, $d_1=0.6$ mm, $d_2=0.5$ mm, $d_3=6$ mm, $l=2.7$ mm, $l_1=3.2$ mm, $l_2=0.3$ mm, $l_3=3$ mm, $s=2.8$ mm, $w=0.64$ mm, $w_1=0.5$ mm, $w_2=0.6$ mm。介质板采用的是微波复合介质tp-2板,其相对介电常数为9.6,厚为0.65 mm。所制作的滤波器实物如图12所示。滤波器的全波仿真结果如图13所示。滤波器测试采用安捷伦N5230矢量网络分析仪,测试结果如图13所示。全波仿真和测试结果吻合良好。滤波器在2.1~9.0 GHz的通带范围内有良好的矩形度(相对带宽124.3%)以及较低的插入损耗,滤波器与端口匹配良好。在9.5~12.00 GHz的阻带范围内,传输抑

制大于 20 dB, 具有较好的带外抑制能力。

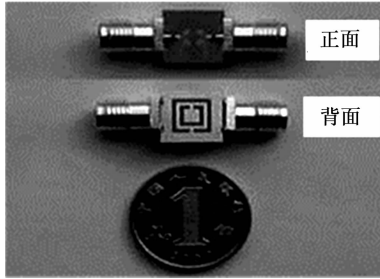


图 12 超宽带滤波器制作实物

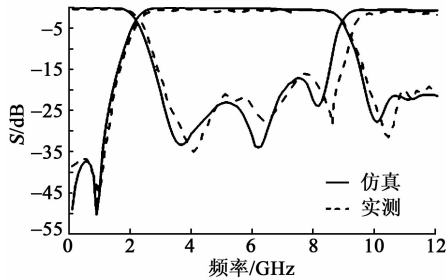


图 13 超宽带滤波器仿真与实测结果

通过以上分析可看出, 本文运用的理论合理且正确, 对滤波器的设计具有指导意义, 所设计的超宽带滤波器相比于所列文献, 具有更好的性能, 比较结果如表 2 所示。

表 2 与文献滤波器的性能比较

	-10 dB 带宽范围/GHz	通带内插损/dB	相对带宽/%
文献[2]	3.10~10.60	1.5	109.5
文献[3]	2.78~3.30	1.2	17.1
文献[7]	2.20~8.00	0.8	113.7
本文	2.10~9.00	0.8	124.3

3 结束语

针对文献中滤波器尺寸较大, 带宽窄, 带内反射损耗大且高端抑制不理想等缺点, 本文改进设计了一款基于分形复合左右手结构加载短截线的超宽带滤波器, 在保证选择性的前提下, 该滤波器仅采用一个 CRLH 单元, 具有尺寸小, 超宽带 2.1~9 GHz (相对带宽 124.3%) 和带内反射损耗小 (小于 0.8 dB) 的特点。仿真和测试结果均一致, 表明该滤波器具有较好的带外抑制能力, 验证了设计方法的有效性。

参考文献:

[1] 叶骏东, 徐志军, 屈德新, 等. 超宽带滤波器技术的研究与进展[J]. 军事通信技术, 2015, 36(1): 18-23.

YE Jundong, XU Zhijun, QU Dexin, et al. Research and progress in ultra-wideband filter[J]. Journal of Military Communication Technology, 2015, 36(1): 18-23.

[2] 褚庆昕, 黄健全, 刘传运. 基于 CRLH 结构的小型超宽带滤波器[J]. 天津大学学报, 2011, 44(4): 359-363.

CHU Qingxin, HUANG Jianquan, LIU Chuanyun. Compact UWB band-pass filter based on CRLH structure [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(4): 359-363.

[3] 安健. 复合左右手传输线理论与应用研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2013.

[4] 李天鹏. 基于碎片理论与左手材料应用研究的滤波器设计[D]. 西安: 空军工程大学, 2015.

[5] CMOJEVIC V, RADONIC V, JOKANOVIC B. Fractal geometries of complementary split-ring resonators[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2008, 56(10): 2312-2321.

[6] 刘云, 赵永久. 高端锐截止的短截线超宽带滤波器[J]. 微波学报, 2011, 27(4): 43-44.

LIU Yun, ZHAO Yongjiu. Ultra-wideband (UWB) stub filter with steep rejection slope at the high edge of pass band [J]. Journal of Microwaves, 2011, 27(4): 43-44.

[7] 许河秀, 王光明, 张晨新, 等. 基于分形互补开口环谐振器的复合左右手传输线研究[J]. 工程设计学报, 2011, 18(1): 71-76.

XU Hexiu, WANG Guangming, ZHANG Chenxin, et al. Novel design of composite right/left handed transmission line based on fractal shaped geometry of complementary split ring resonators [J]. Journal of Engineering Design, 2011, 18(1): 71-76.

[8] 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.

ZHANG Zhonghua, HUANG Jie, LIN Guanglin, et al. Dual-band filter based on CSRR-HMSIW and compact short-circuited CRLH-TL resonator [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2015, 37(2): 167-172.

[9] 陈龙. 基于复合左右手传输线的滤波天线研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.

[10] 林丹艳, 周稀朗. 基于 CRTH-TL 及 CSRR 的带通滤波器[J]. 计算机仿真, 2011, 26(12): 325-328.

LIN Danyan, ZHOU Xilang. A new bandpass filter based on CRLH-TL and CSRR [J]. Computer Emulation, 2011, 26(12): 325-328.