

新型复合左右手传输线在宽频微带正交功分器中的应用

杨小雷¹, 张晨新¹, 靳 聪²

(1. 空军工程大学导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要 提出了一种基于 Minkowski 互补开口环谐振器(M - CSRRs)的微带复合左右手传输线(CRLH TL)。采用电磁仿真、等效电路模型计算、实验测量相结合的方式研究了 CRLH TL 的传输特性。在此基础上将 CRLH TL 应用于宽带微带正交功分器设计和加工制作。仿真与测试结果表明:在 2.7 - 6.6 GHz 的频带内,回波损耗大于 10 dB,隔离度优于 15 dB,相位不平衡和幅度不平衡分别小于 $90^\circ \pm 7^\circ$ 和 0.8 dB,相对带宽达到了 83.9%。测试结果验证了该 CRLH TL 设计的有效性。

关键词 正交功分器;复合左右手传输线;互补开口环谐振器;宽频带;小型化

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.04.011

中图分类号 TN526 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)04-0048-04

正交功分器作为平衡放大器,移相器和平衡混频器的必不可少的组成部分^[1-2],得到越来越广泛的应用,但其在实现小型化、宽频带及严格 90° 相移输出等方面还存在不少困难。近年来国内外大量应用于正交功分器的新型传输线被设计和制作出来。文献[3]中利用集总元件实现 CRLH TL,文献[4]提出了基于共面波导的 CRLH TL,文献[5]报道了负折射率异向介质传输线。

以上设计尽管可以一定程度上改善正交功分器的性能,却难以达到较为满意的宽频带和小型化要求。由于分形几何结构的填充特性和自相似性可以转化成微波器件的小型化、多频带或宽频带特性,因此被越来越多地应用于微波工程中^[6-7]。文献[8]在互补开口环谐振器设计中采用正方形 Sierpinski 分形曲线结构,取得较好的小型化效果。本文提出并设计了基于 Minkowski 互补开口环谐振器(M - CSRRs)的 CRLH TL,并在此基础上将其应用于宽频带正交功分器的设计和制作。

1 新型 CRLH TL 单元和等效电路模型

以数学家 Helge Von Koch 命名的经典 Koch 曲线结构,被广泛应用于各种传统微波器件的小型化和宽频带设计中。文献[9]给出了该曲线的具体生成方法。本文中的分形结构采用 Minkowski 环分形结构^[10],其中迭代因子取为 1/4。

基于 Minkowski 环分形结构的 CRLH TL 单元见图 1(a)。其中灰色部分是微带接地板,白色部分为地板上要刻蚀的 M - CSRRs。中间的黑色部分为交指电容,其左右两边连接微带导体线。在该结构中,利用交指电容来实现左手传输线的负磁导率效应,而通过 M - CSRRs 实现负介电常数效应。由于引入分形结构并不会在等效电路模型中带来额外的集总元件,因此传统的 T 形等效电路同样适用于该结构。图 1(b)为 CRLH TL 单元等效电路,其中 L_s 表示微带线电感, C_g 代表微带线上缝隙电容效应, C 等效为线电容以及微带线间隙与 CSRRs 的边缘电容效应, L_p 、 C_p 代表 CSRRs 通过电耦合后的谐振回路,两端的微带线 p 用于补偿连接 SMA 接头而伸出的右手传输线效应。从实现小型化与宽频带特性考虑,文中的 CSRRs 采用了一次 Minkows-

* 收稿日期:2011-04-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60971118)

作者简介:杨小雷(1987-),男,陕西武功人,硕士生,主要从事目标特性、天线与毫米波电路研究。

E-mail: yangxiaolay2005@163.com

ki 环结构。在 CSRRs 中引入分形结构可以有效地增加地板刻蚀槽的电流路径,因此 CRLH TL 单元的传输零点会相应地向低频段移动,即引入分形结构的 CSRRs 能够用于设计电小 CRLH TL 单元。由于引入分形结构的 CRLH TL 可以用来调整电路参数使其工作于平衡态,进而有效增加带宽,而该领域在国内外还未见报道,所以本文将着重研究其宽频带特性。

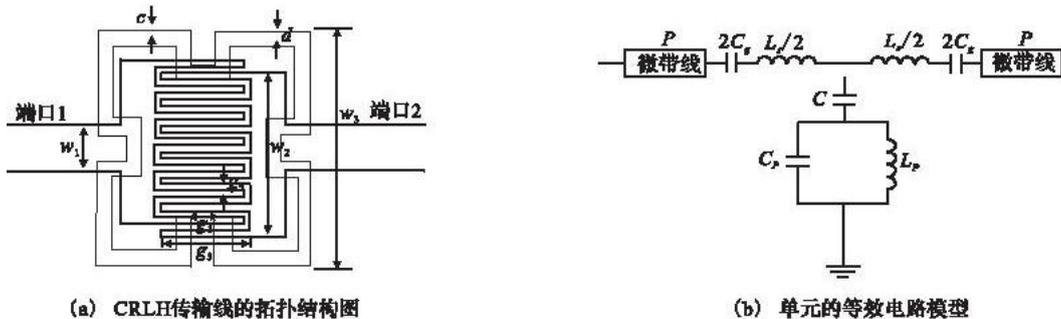
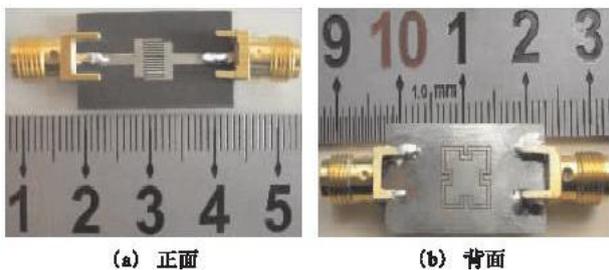


图 1 新型 CRLH TL 单元

Fig. 1 The proposed CRLH TL element

图 2 为基于 M - CSRRs 的 CRLH TL 单元的实物加工图。CRLH TL 单元尺寸为 $0.16\lambda_g$, 其中 λ_g 为中心工作频率处的波导波长。文中介质基板采用相对介电常数为 2.2 的 RT/duroid 5880, 基板厚度为 0.508 mm。通过仿真软件进行优化后得到 CRLH TL 单元尺寸为: $w_1 = 1.6 \text{ mm}, w_2 = 5 \text{ mm}, w_3 = 7.5 \text{ mm}, g_1 = 0.2 \text{ mm}, g_2 = 0.2 \text{ mm}, g_3 = 3 \text{ mm}, c = 0.2 \text{ mm}, d = 0.3 \text{ mm}$ 。本文首先利用电磁场仿真软件 Ansoft Designer 和电路仿真软件 Serenade 分别对新型 CRLH TL 单元进行仿真, 然后利用矢量网络分析仪 Anritsu ME7808A 对实际单元进行了测量。电磁场仿真过程中, 通过 Ansoft Designer 对传输线单元进行分析得到 S 参数, 然后将 S 参数导入电路仿真软件 Serenade 中进行电仿真, 最后提取了等效电路各集总元件的参数值(见表 1)。



(a) 正面

(b) 背面

图 2 CRLH TL 单元的实物加工图

Fig. 2 The prototype of the proposed CRLH TL cell

表 1 等效电路提取的各集总元件参数值

Tab. 1 Extracted lumped element parameters

L_s/nH	C_g/pF	C/pF	L_p/nH	C_p/pF	p/mm
2.92	0.86	2.11	3.5	0.62	8

图 3 给出了该 CRLH TL 单元的仿真与测试结果。从图 3(a) 可以看出在 0.5 - 8 GHz 的频率范围内, 电磁场仿真、电路仿真和测试结果吻合较好, 从而实验验证了设计的有效性。由测试结果可以看出基于 M - CSRRs 的 CRLH TL 的 -10 dB 回波损耗带宽为 2.2 - 8 GHz, 其 3 dB 带宽(2 - 8 GHz) 与基于传统 CSRRs 加载的 CRLH TL 带宽(2.6 - 4.3 GHz) 相比明显展宽, 通带内频率低端插入损耗接近 0 dB。CRLH TL 单元的相位曲线(见图 3(b)) 显示了左手结构的非线性色散关系, 在高频段上仿真与测试的相位差异主要是由接头焊点引起的分布电感和分布电容所致。

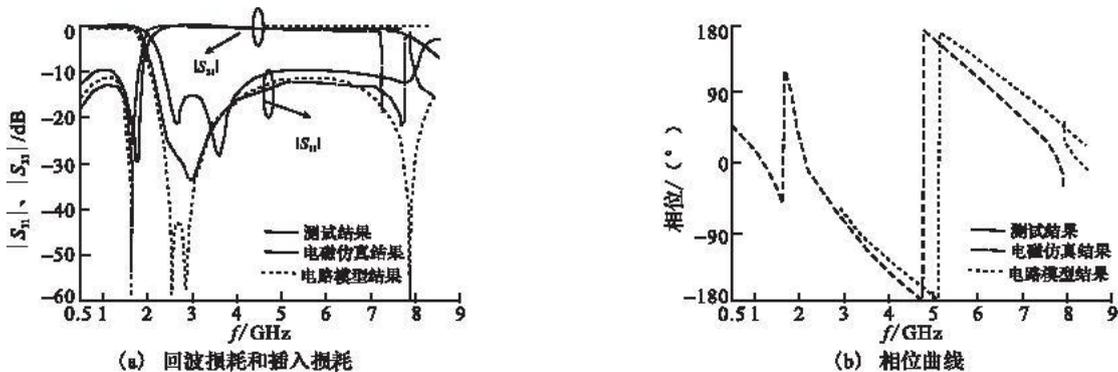


图 3 新型 CRLH TL 单元的 S 参数曲线

Fig. 3 S parameters of the CRLH TL cell

2 新型 CRLH TL 在宽带正交功分器中的应用

鉴于上文提出的 CRLH TL 单元的优良特性,将其引入正交功分器的宽频带设计。新的正交功分器由两部分组成,一部分是威尔金森功分器;另一部分是由新型 CRLH TL 和传统的微带线构成的 90° 差分相移线。为了获得宽频带和输出端口间的良好隔离,功分器采用二级阻抗变换形式;差分相移线的设计通过调节 CRLH TL 的几何参数和另一段微带线的长度,以达到 90° 的相位差。正交功分器的加工实物图见图 4。

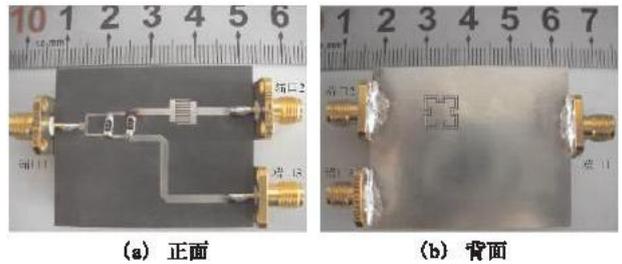


图 4 正交功分器实物图

Fig. 4 Prototype of novel designed QPS

图 5(a) 显示了正交功分器的回波损耗的仿真和测试结果,可以看出从 2.1 GHz 到 7.6 GHz,测试的回波损耗均优于 10 dB,其中在 4 GHz 上具有最好的回波损耗(优于 40 dB)。图 5(b) 显示了正交功分器传输系数 $|S_{21}|$ 、 $|S_{31}|$ 的仿真和测试结果,以及输出端口之间的幅度不平衡的仿真和测试结果,可以看出仿真和测试结果吻合较好(其中在 2.15 - 6.6 GHz 的频带内,测试的幅度不平衡优于 0.8 dB)。由于采用的是低介电常灵敏的介质基板,因此辐射损耗较大,并且随着频率的升高而加剧。从图 5(c) 可以看出,在 2.1 - 7.8 GHz 的频带内,隔离度低于 15 dB。仿真结果与实测结果存在差异的原因主要在于实际中贴片电阻存在着 $\pm 10\%$ 的容差。图 5(d) 给出了输出端口之间相位不平衡的仿真和测试结果,由测试结果可以看出,在 2.7 - 7.1 GHz 的频率范围内,输出端口之间的相位不平衡小于 $90^\circ \pm 7^\circ$ 。

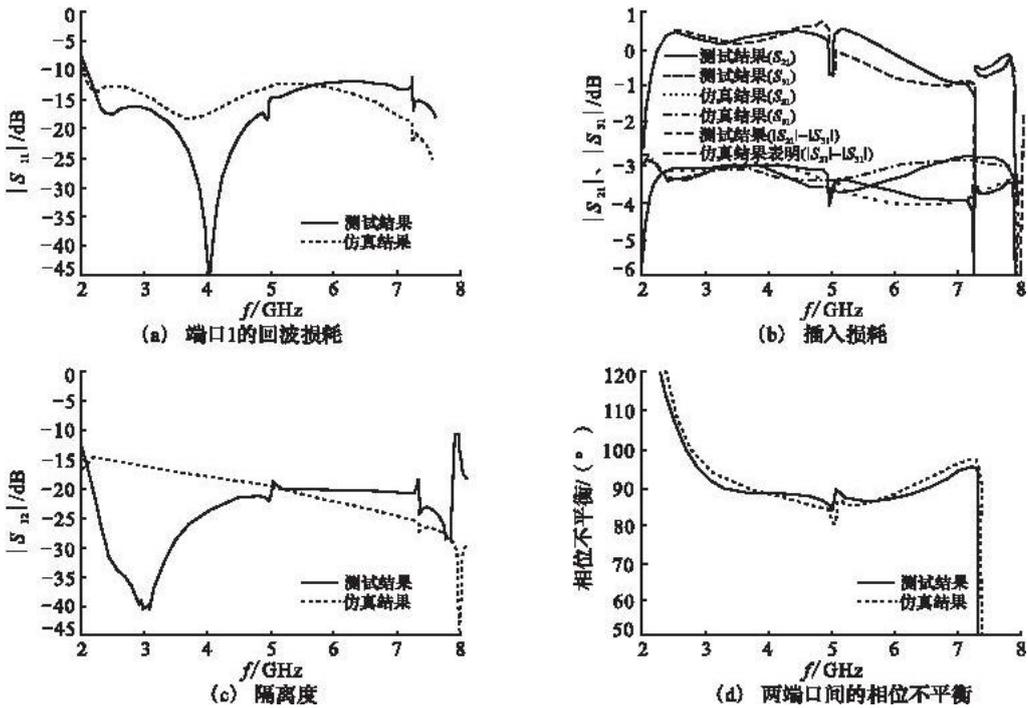


图 5 正交功分器的 S 参数仿真和测试结果

Fig. 5 Simulated and measured S parameters of the proposed QPS

3 结束语

本文提出了一种新颖的 CRLH TL 结构,并采用电磁仿真、等效电路模型计算、实验测量相结合的方式研究了该 CRLH TL 的传输特性,仿真与测试结果表明引入分形结构显著展宽了 CRLH TL 的工作带宽(相对带宽达到 120%)。在此基础上,将该 CRLH TL 应用于正交功分器设计制作,与文献[11]中基于缺陷地结构(DGS)的正交功分器相比,相对带宽由 76% 增加到 83.9%,中心工作频点较文献[11]下降 31%,实现了宽

频带和小型化,验证了该传输线结构在无源器件设计中的有效性。新型 CRLH TL 结构不仅改善了传统 CRLH TL 的性能,更为微波器件设计提供了新思路,在微波工程中具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Harned K W, Freundorfer A P, Antar Y M M. A new broadband monolithic passive differential coupler for K/Ka band applications[J]. IEEE transactions on microwave theory and technique, 2006, 54(6):2527 – 2533.
- [2] Chen H C, Chang C Y. Modified vertically installed planar couplers for ultrabroadband multisection quadrature hybrid[J]. IEEE microwave wireless components letters, 2006, 16(18):446 – 448.
- [3] Dan Kuylenstierna, Sten E Gunnarsson, Herbert Zirath. Lumped – element quadrature power splitters using mixed right/left – handed transmission lines[J]. IEEE transactions on microwave theory technique, 2005, 53(8):2616 – 2621.
- [4] Mao Shaugang, Chueh Yuzhi. Broadband composite right/left – handed coplanar waveguide power splitters with arbitrary phase responses and balun and antenna applications[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2006, 54(1):243 – 250.
- [5] Rubaiyat Islam, George V, Eleftheriades. Compact corporate power divider using metamaterial NRI – TL coupled – line couplers[J]. IEEE microwave wireless components letters, 2008, 18(7):440 – 442.
- [6] Chen Wenling, Wang Guangming, Zhang Chenxin. Bandwidth enhancement of a microstrip – line – fed printed wide – slot antenna with a fractal – shaped slot[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2009, 57(7):2176 – 2179.
- [7] Hatem Rmili, Otman E I Mrabet, JeanMarie Floch. Study of an electrochemically – deposited 3 – D random fractal tree – monopole antenna[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2007, 55(4):1045 – 1050.
- [8] Vesna Crnojevic Bengin, Vasa Radonic, Branka Jokanovic. Fractal geometries of complementary split – ring resonators[J]. IEEE transactions on microwave theory and technique, 2008, 56(10):2312 – 2321.
- [9] Kenneth Falconer. Fractal geometry[M]. New York: John wiley & sons, 2003.
- [10] 陈文灵. 分形几何在微波工程中的应用研究[D]. 西安:空军工程大学,2008.
CHEN Wenling. Investigations into the applications of fractal geometry in microwave engineering[D]. Xi'an: Air force engineering university, 2008. (in Chinese)
- [11] 安建. 复合左右手传输线理论与应用研究[D]. 西安:空军工程大学,2009.
AN Jian. Research on theory and applications of composite right/left – handed transmission line[D]. Xi'an: Air force engineering university, 2009. (in Chinese)

(编辑:田新华)

Application of A New Type of Composite Right/Left Handed Transmission Line to the Microstrip Broadband Quadrature Power Splitter

YANG Xiao – lei¹, ZHANG Chen – xin¹, JIN Cong²

(1. Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China; 2. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: This paper presents a new type of microstrip composite right/left handed transmission line (CRLH TL) constructed by Minkowski loop shaped complementary split ring resonators (M – CSRRs) and interdigital capacitor in the upper metal level. Transmission behavior of novel CRLH TL is researched by EM simulation as well as electrical simulation and validated by experimental measurement. By using the CRLH TL effect, a broadband quadrature power splitter (QPS) is designed and fabricated. The simulation and tested results show that within the frequency band range of 2.7 – 6.6 GHz, all return losses are greater than 10dB while the isolation is better than 15dB, phase non – equilibrium and transmission magnitude difference between two outputs are less than $90^\circ \pm 7^\circ$ and 0.8 dB respectively, thus the relative bandwidth reaches 83.9%.

Key words: quadrature power splitter (QPS); composite right/left – handed transmission line (CRLH TL); complementary split ring resonates (CSRRs); broadband; miniaturization