

DOI:10.3785/j.issn.1006-754X.2008.03.012

基于 CRLH-TL 零阶谐振特性的 新型串联功分器

范如东, 刘长军

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘 要: 结构紧凑的功分器是微波信号分离、阵列天线馈电等应用场合的重要器件。利用混合右/左手传输线(CRLH-TL)来设计小尺寸的串联功分器, 并对混合右/左手传输线的色散特性进行理论分析。利用贴片电容和微带线电感设计了一种新的混合右/左手传输线, 处于零阶谐振状态的混合右/左手不引入相位偏移且波长为无穷大。基于 CRLH-TL 的零阶谐振特性设计制作了一个工作在 2.45 GHz 的 4 路微波功分器。此功分器等幅同相地将输入功率分配到各个输出端口, 输出端口位置对功率分配没有影响。使用矢量网络分析仪对该功分器进行了实验测量, 结果表明: 在 2.20~2.65 GHz 的频率范围内, 功分器各输出端口功率相差在 1 dB 内; 在 2.22~2.56 GHz 的频率范围内, 输出端口的相位差在 15° 以内。测量结果与仿真结果吻合良好。该微波功分器结构紧凑, 可扩展到任意多个输出端口。

关键词: 左手材料; 混合右/左手传输线; 零阶谐振; 功分器

中图分类号: TN62

文献标识码: A

文章编号: 1006-754X(2008)03-0213-03

Novel series power divider based on zeroth-order resonance of composite right left-handed transmission line

FAN Ru-dong, LIU Chang-jun

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Compact power divider is a crucial part in microwave signal dividing and antenna array feeds. A composite right/left-handed transmission line (CRLH-TL) was applied to design of a small-size series power divider and theoretic analysis of its dispersion characteristics was conducted. A novel CRLH-TL by utilizing chip capacitors and micro-strip inductors was presented. The CRLH-TL at zero-order resonant frequency does not induce phase shift and supports an infinite wavelength, and then based on its vibrating properties, a 4 series microwave power divider working at 2.45 Hz was designed and manufactured. This divider equally divided input power to each output port and the position of output port had no influence on it. The manufactured divider was measured by a vector network analyzer. The magnitude difference between output ports is less than 1 dB from 2.20 GHz to 2.65 GHz, and the phase difference between output ports is less than 15° from 2.22 GHz to 2.56 GHz. The measured results well accord with the simulated results. In addition, this divider is very compact and flexible, and can be extended to an random number of output ports.

Key words: left-handed material; CRLH-TL; zeroth-order resonance; power divider

苏联科学家 V. Veselago 于 1968 年首次提出了左手材料的概念并指出其与普通材料截然相反的一些特性^[1]。近年来, 左手材料的特殊性质及潜在应用不断被发掘, G. V. Eleftheriades 等人提出了微带线周期加载串联电容并联电感组成的平面一维左

手传输线结构并作了实验验证^[2]。这种结构被成功用到移相器、耦合器、巴伦等微波器件的设计之中^[3-5]。Ittoh 等人提出了 CRLH-TL 的概念并用传输线理论对其作了分析^[6]。处于零阶谐振状态的 CRLH-TL 不引入相位延迟且波长为无穷大。基于

收稿日期: 2007-10-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(603010004).

作者简介: 范如东(1982—), 男, 河南信阳人, 硕士, 从事电磁场与微波技术研究, E-mail: fanrudong@gmail.com.

这种特性可以灵活地造出 n 路功分器, 功分器的分支可以在传输线的任意节点引出^[7].

CRLH-TL 的单元电路通常用两种方式实现: 微带线串联集总电容和并联集总电感^[2]; 交指电容加并联短路支线^[6]. 本文提出了一种新的易于实现和调整的对称 CRLH-TL 单元结构, 基于这种结构设计并制作了一个 1 : 4 功分器.

1 理 论

考虑一段长为 l 、两端开路的 CRLH 传输线, 它也可以等效为无限多个单元, 每个单元由一个串联谐振器和一个并联谐振器组成^[6], 如图 1 所示.

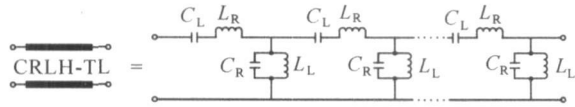


图 1 CRLH-TL 的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit model of a CRLH-TL
据等效传输线原理, CRLH-TL 的色散关系为:
$$\beta(\omega) = \begin{cases} +\omega \sqrt{L_R C_R} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{se}}{\omega}\right)^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{\omega_{sh}}{\omega}\right)^2\right] & (\omega > \max(\omega_{se}, \omega_{sh})) \\ -\omega \sqrt{L_R C_R} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{se}}{\omega}\right)^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{\omega_{sh}}{\omega}\right)^2\right] & (\omega < \min(\omega_{se}, \omega_{sh})) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\omega_{se} = 1/\sqrt{L_R C_L}$ 为串联谐振频率, $\omega_{sh} = 1/\sqrt{L_L C_R}$ 为并联谐振频率, CRLH-TL 在 $\omega \in \{\min(\omega_{se}, \omega_{sh}), \max(\omega_{se}, \omega_{sh})\}$ 范围内呈现禁带特性. 当满足平衡条件时, $\omega = \omega_{se} = \omega_{sh}$, 且 $\beta(\omega) = 0$. CRLH-TL 的平衡条件可以表示为:

$$L_R C_L = L_L C_R \quad (2)$$

如果把这段传输线当作一个 n 阶谐振器(n 为谐振模数, 可以取负值), 则有如下关系:

$$\beta_n = \frac{n\pi}{l} \quad (3)$$

当 $n=0$ 时, $\beta_n=0$, 此时工作频率为 ω , 传输线处于零阶谐振状态; 沿线任意点微波等幅同相, 任意长的传输线引入的相位延迟/超前为 0^[8].

基于这种零阶谐振特性, 可以在传输线的任意节点引出分支. 如果每个分支的终端阻抗相等, 它们将得到等幅同相的功率分配, 这样就可以构成一个结构灵活的多端口功分器, 如图 2 所示.

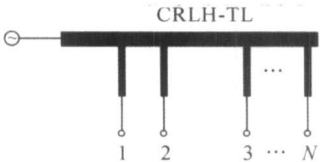


图 2 新型功分器的结构

2 CRLH-TL 与功分器设计

由图 1 中 CRLH-TL 的等效电路可知, 每个单元可看作由一个串联谐振器和一个并联谐振器组成的非对称结构, 此非对称结构可以变换为对称结构^[3]. 那么, 等效电路可看作由无限多个图 3(a)所示的单元组成. 采用微带线并联短路支线、串联贴片电容的方式来实现单元电路, 如图 3(b)所示. 电路板为相对介电常数为 2.65, 厚度为 1 mm 的介质敷铜板, 采用 0603 的贴片电容, $C_L=3.3$ pF, 串联微带线的长度 $L_{RH TL}=3.6$ mm, 宽度 $W_{RH TL}=2.72$ mm, 电感支线长度 $L_{inductor}=13$ mm, 线宽 0.8 mm, 末端通过直径 0.6 mm 的过孔接地.

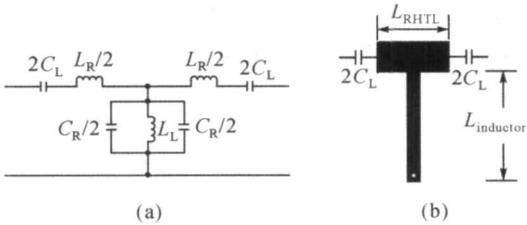


图 3 CRLH-TL 单元电路及其实现

Fig. 3 A unit cell of the CRLH-TL

基于上面 CRLH-TL 的理论和分析, 设计了一个工作在 2.45 GHz 的 1 : 4 功分器. CRLH-TL 由 10 个单元组成, 功分器每个支路阻抗为 200 Ω , 通过特性阻抗 100 Ω 的 $\lambda/4$ 阻抗变换器匹配到 50 Ω 输出端口, 如图 4 所示. 功分器整体尺寸为 80 mm $\times$ 65 mm, 实物照片如图 4(b)所示.

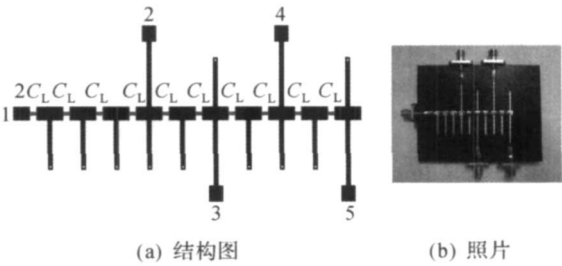


图 4 功分器的结构和照片

Fig. 4 Layout and photograph of the power divider

使用电磁仿真软件对功分器进行了模拟, 同时用矢量网络分析仪对该功分器的 S 参数作了测量, 模拟和测量结果如图 5 所示. 在 2.20~2.65 GHz 的频率范围内, 功分器各端口功率分配相差在 1 dB 内; 在 2.22~2.56 GHz 的频率范围内, 相位差在 15 $^\circ$ 以内. 通过对比发现, 测量结果和仿真结果吻合较好. 贴片电容存在寄生的等效串联电感和等效串联电阻, 故测量结果与仿真结果有一定的偏差, 但在要求的误差范围以内.

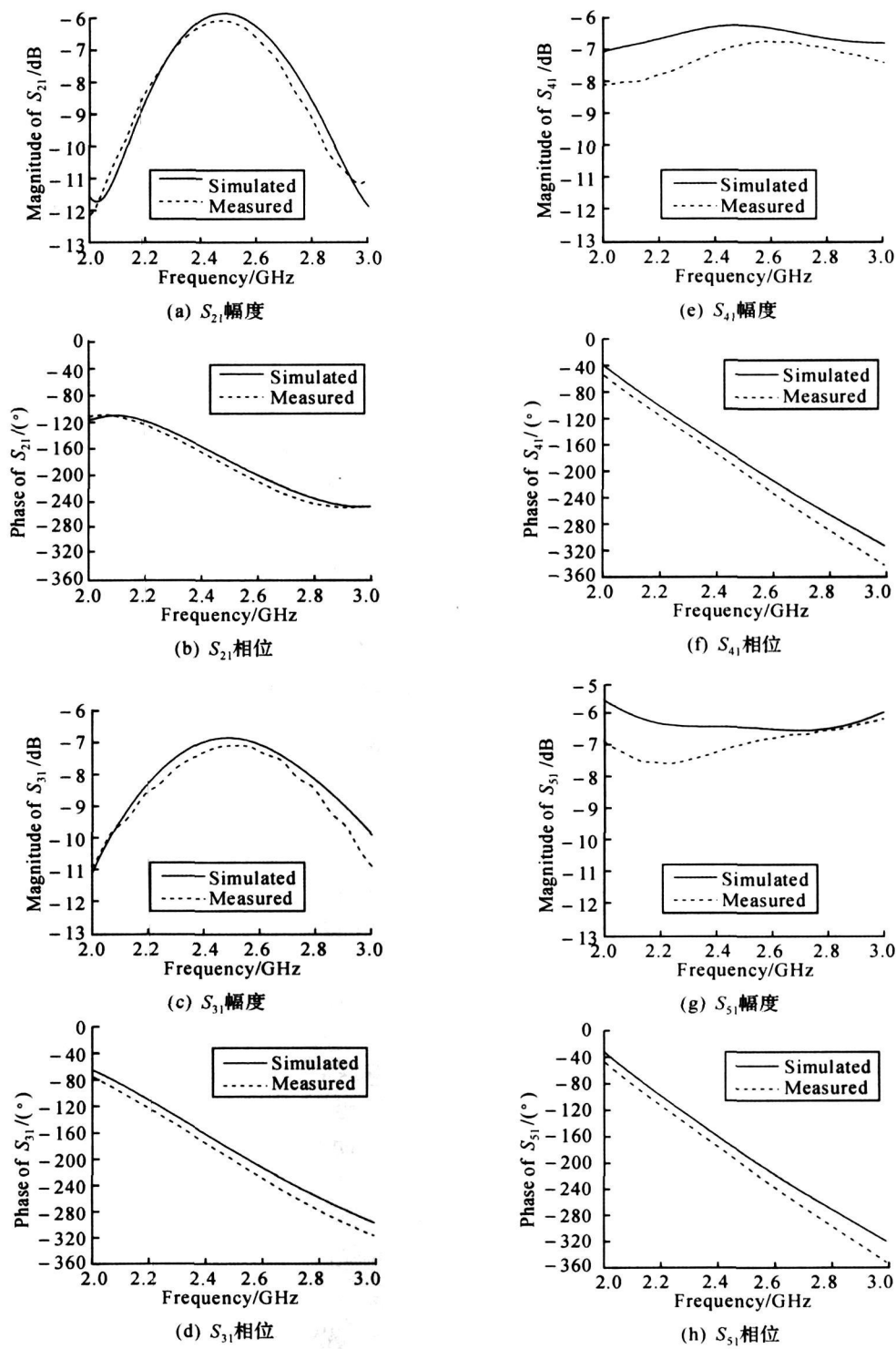


图 5 功分器模拟和测量结果

Fig. 5 Simulated and measured results of the power divider

3 结 论

本文从传输线理论出发,介绍了 CRLH-TL 的零阶谐振特性,提出了一种新型的对称 CRLH-TL 单元电路,此单元结构易于实现且调整方便.基于 CRLH-TL 的零阶谐振特性,设计制作并测量了一个工作在

2.45 GHz 的 1 : 4 串联功分器.实验结果表明:此功分器能够等幅同相地向各输出端口分配功率.此类功分器结构小巧灵活,可扩展性强,可以用于阵列天线的馈电网络等场合,具备很好的应用前景.

(下转第 228 页)

[1] YANG Zhen, LI Qiang, QIU Yang. A new type of car crash simulating test [C]// 4th International Symposium on test and Measurement. Shanghai, 2001; 646-649.

[2] 张相炎, 郑建国, 杨军荣. 火炮设计理论 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005; 117-129.

ZHANG Xiang-yan, ZHENG Jian-guo, YANG Jun-rong. Fire design theory [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005; 117-129.

[3] 李 强, 杨 臻, 张 雨. 液压节制杆式模拟汽车碰撞吸能装置研究 [J]. 力学与实践, 2003, 25; 22-24.

LI Qiang, YANG Zhen, ZHANG Yu. A study on hydraulic rod controlled automobile crash simulation absorber [J]. Mechanics in Engineering, 2003, 25; 22-24.

[4] 李闽溟, 吴继刚. Visual C++6.0 数据库系统开发实例导航 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002; 11-38.

LI Min-ming, WU Ji-gang. Visual C++6.0 database system development case navigation [M]. Beijing: People's

Posts and Telecommunication Press, 2002; 11-24.

[5] 邢 丽, 董石麟, 曹 喜. 面向对象的索穹顶结构优化设计程序结构 [J]. 工程设计学报, 2004, 11(6); 351-356.

XING Li, DONG Shi-lin, CAO Xi. Object-oriented program architecture for optimal design of tensegrity cable domes [J]. Journal of Engineering Design. 2004, 11(6); 351-356.

[6] 杨 臻, 邱 阳, 薄玉成. 利用弹塑性变形控制碰撞与接合 [J]. 振动工程学报, 2003, 16(2); 238-241.

YANG Zhen, QIU Yang, BO Yu-cheng. Controlling crash-connection with elastic-plastic deformation [J]. Journal of Vibration Engineering, 2003, 16(2); 238-241.

[7] 杨 臻, 邱 阳, 薄玉成. PG-15 型节制杆式台车试验系统的稳定性和重复性 [J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(1); 89-91.

YANG Zhen, QIU Yang, BO Yu-cheng. Study of PG-15 contral staff sled test technology [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(1); 89-91.

(上接第 197 页)

[10] 黄 平, 张 炜, 陈英俊, 等. 外磁场控制微机器人运动及位姿系统; 中国, CN200963827 [P]. 2007-10-24.

HUANG Ping, ZHANG Wei, CHEN Ying-jun, et al. Movement and pose system of a micro-robot controlled by outer magnetic field; China, CN200963827 [P]. 2007-10-24.

[11] 黄 平, 张 炜, 陈英俊, 等. 外磁场控制微机器人运动及位姿系统及其控制方法与应用; 中国, CN1944003 [P]. 2007-04-11.

HUANG Ping, ZHANG Wei, CHEN Ying-jun, et al. The movement and pose system and its control methods and applications of a micro-robot driven by outer magnetic field; China, CN1944003 [P]. 2007-04-11.

[12] 张 炜. 体内胶囊微机电系统的外磁驱控机理与实验研究 [D]. 广州: 华南理工大学机械学院, 2007.

ZHANG Wei. Theoretical and experimental study on

driving and controlling a capsule mems by an outer magnetic field [D]. Guangzhou: South China University of Technology, School of Mechanical Engineering, 2007.

[13] 张 炜, 黄 平. 胶囊微机器人在离体生物环境下的力学实验研究 [J]. 润滑与密封, 2007, 32(6); 15-18.

ZHANG Wei, HUANG Ping. Mechanically experimental study on a capsule robot in vitro [J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(6); 15-18.

[14] ZHANG Wei, CHEN Ying-jun, HUANG Ping. Experimental study on a capsule-like robot driven by an outer rotating magnetic field [J]. 工程设计学报, 2007, 14(2); 89-96.

[15] 倪光正. 工程电磁学原理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002; 128.

NI Guang-zheng. Electromagnetic engineering principles [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002; 128.

(上接第 215 页)

参考文献:

[1] VESELAGO V. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4); 509-514.

[2] ELEFTHERIADES G V, IYER A K, KREMER P C. Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2002, 50(12); 2702-2712.

[3] ANTONIADES M A, ELEFTHERIADES G V. Compact linear lead/lag metamaterial phase shifters for broadband applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propag Lett, 2003, 2(7); 103-106.

[4] ISLAM R, ELEFTHERIADES G V. Phase-agile branch-line couplers using metamaterial lines [J]. IEEE Microwave and

Wireless Components Letters, 2004, 14(7); 340-342.

[5] ANTONIADES M A, ELEFTHERIADES G V. A broadband wilkinson banlun using microstrip metamaterial lines [J]. IEEE Antennas and Wireless Propag Lett, 2005, 4(7); 209-212.

[6] LAI A, CALOZ C, ITOH T. Composite right/left-handed transmission line metamaterials [J]. IEEE Microwave Magazine, 2004, 5(3); 34-50.

[7] LAI A, LEONG Kevin M K H, ITOH T. A novel n-port series divider using infinite wavelength phenomena [C]. IEEE MTT International Symp, Long Beach, CA, 2005; 1001-1004.

[8] SANADA A, CALOZ C, ITOH T. Novel zeroth-order resonance in composite right/left-handed transmission line resonators [C]. Asia-Pacific Microwave Conference, Seoul, Korea, 2003, 1588-1592.