doi:103969/j. issn. 0490-6756. 2010. 03. 020

基于集总参数电容的新型混合左右手传输线设计

杨　滔，刘长军，黄　文，李雨浓
(四川大学电子信息学院，成都 610064)

摘　要：基于混合左右手传输线(CRLH-TL)理论，结合 LC 网络单元结构，使用贴片电容和终端短路微带线，设计并制作了 CRLH-TL. 此 CRLH-TL 结构小巧，易于实现，有较好的性能. 实验测量结果表明：此 CRLH-TL 的带宽为 1 GHz ～ 5 GHz；中心频率为 2.97 GHz，此时传输线的相移为零；插入损耗低于 1.3 dB，回波损耗大于 10 dB. 测量结果和仿真结果吻合较好.

关键词：混合左右手传输线；贴片电容；微带
中图分类号：TN601　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：0490-6756(2010)03-0511-04

A novel composite Right/Left-Handed transmission line based on lumped capacitors

YANG Tao, LIU Chang-Jun, HUANG Wen, LI Yu-Nong
(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Based on the theory of composite right/left-handed transmission line (CRLH-TL) and the LC circuit network, a CRLH-TL using surface mounted capacitors and short-ended microstrip lines is presented. The CRLH-TL is compact and easy to fabricate, and its bandwidth is from 1 GHz to 5 GHz while the center frequency is at 2.97 GHz, at which there is no phase shifting. The insertion loss is less than 1.3 dB, and the return loss is greater than 10 dB. Measurements agree well with simulation results.

Key words: composite right/left-handed transmission line, surface mounted capacitor, microstrip line

1　引　言

1968 年，前苏联科学家 Veselago 首次在理论上提出了一种同时拥有负介电常数和负磁导率的新型材料，即左手材料，并且指出了它的一些新颖特性，例如：逆斯涅耳定律，逆多普勒效应，逆切伦科夫辐射特性. 30 多年后，加州大学圣地亚哥分院的一个研究小组实验验证了左手材料的存在，他们利用开环谐振器和细导线，构造出了负介电常数和负磁导率结构[1]. 但是这种左手结构损耗很大，并且带宽也很窄，并不宜实际的微波应用. 近年来，T. Itoh 和 G. V. Eleftheriades 等人提出，利用传输线理论来描述和设计左手材料[2]. 这种新结构的损耗更低，带宽更宽，结合左手材料的特性，能够广泛地应用在微波领域.

首先用传输线理论对混合左右手传输线(Composite Right/Left-Handed Transmission Line, CRLH-TL)结构进行分析，得出等效的相关

收稿日期：2008-08-26
基金项目：国家自然科学基金(60971051)；四川省青年基金(09ZQ026-016)
作者简介：杨滔(1985－)，男，四川省简阳市人，硕士研究生，主要研究方向为射频无线通信.
通讯作者：刘长军. E-mail：cjliu@scu. edu. cn

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参数. 然后依照 CRLH-TL 理论,用集总电容和微带线设计出 5 单元 CRLH-TL. 这种新型 CRLH-TL 结构,体积小,宽频带,易于实现,可以广泛应用于移相器、耦合器等微波器件,有良好的应用前景.

2 CRLH-TL 理论及其设计

在现实世界,人们还没有发现纯的左手(Left-Handed,LH)结构,因为总是无法避免的会出现寄生的串联电感和并联电容[3]. 因此,T. Itoh 等人结合传输线理论提出 CRLH-TL 的概念,CRLH 结构也成为研究左手特性结构最常用的形式[3]. 如图 1 所示,CRLH-TL 等效模型包括:电感 L'_R 和电容 C'_L 级联组成的串联支路,电容 C'_R 和电感 L'_L 并联组成的并联支路.

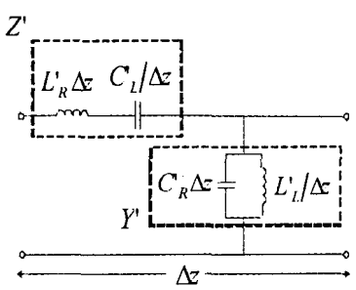

图 1 均匀 CRLH-TL 等效电路模型

Fig. 1 Equivalent circuit model for homogeneous CRLH-TL

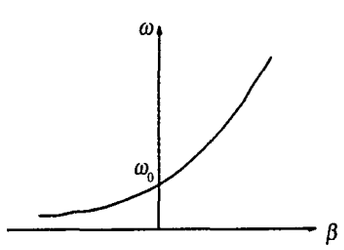

图 2 平衡 CRLH-TL 的色散曲线

Fig. 2 Dispersion diagram for balanced CRLH-TL

对于理想的 CRLH-TL,它的色散关系为:

$$\beta(\omega) = s(\omega) \cdot \sqrt{\omega^2 L'_R C'_R + \frac{1}{\omega^2 L'_L C'_L} - \left(\frac{L'_R}{L'_L} + \frac{C'_R}{C'_L}\right)} \tag{1}$$

其中,

$$s(\omega) = \begin{cases} -1 & \text{if } \omega < \omega_{\Gamma 1} = \min\left(\frac{1}{\sqrt{L'_R C'_L}}, \frac{1}{\sqrt{L'_L C'_R}}\right) \\ +1 & \text{if } \omega > \omega_{\Gamma 2} = \max\left(\frac{1}{\sqrt{L'_R C'_L}}, \frac{1}{\sqrt{L'_L C'_R}}\right) \end{cases} \tag{2}$$

不难得出:当在 $\omega < \omega_{\Gamma 1}$ 或 $\omega > \omega_{\Gamma 2}$ 的频带内时,β 是纯实数,表现为通带,并且 $\omega < \omega_{\Gamma 1}$ 时 β 为负,LH 模式占主导,而 $\omega > \omega_{\Gamma 2}$ 时 β 为正,右手(Right-Handed, RH)模式占主导;当 $\omega_{\Gamma 1} < \omega < \omega_{\Gamma 2}$ 时,β 为纯虚数,表现为阻带. 这正是 CRLH-TL 所独有的特点.

特别地,当 $L'_R C'_L = L'_L C'_R$(即 $Z_L = \sqrt{\frac{L'_L}{C'_L}} = \sqrt{\frac{L'_R}{C'_R}} = Z_R$)时,被称为平衡状态,色散曲线如图 2 所示. 此时,有 $\omega_{\Gamma 1} = \omega_{\Gamma 2} = \omega_0$,$\beta$ 随 ω 是连续变化的.

另外,对于 CRLH-TL 的等效介电常数和等效磁导率,可以证明它们分别满足[3]:$\mu = L'_R - \frac{1}{\omega^2 C'_L}$,$\varepsilon = C'_R - \frac{1}{\omega^2 L'_L}$. 当传输线工作在 LH 频率范围时,存在负的等效介电常数和负的等效磁导率.

在实际应用中,通常通过周期性级联 LC 网络单元来构造 CRLH-TL. 需要注意 LC 单元尺寸需要小于 $\lambda_g/4$ 才能保证 CRLH-TL 对于电磁波的有效均匀[4].

如果把每个 LC 单元看作是 LH 和 RH 的结合,则每个 LC 单元的相移可近似为[5]:

$$\varphi_{UC} = \varphi_{LH} + \varphi_{RH} = \frac{-1}{\omega\sqrt{L_L C_L}} + \varphi_{RH} \tag{1}$$

可以看出,只要合理设置好 LC 单元的具体参数,就能得到给定频率下任意相移的 CRLH-TL.

传统 CRLH-TL 是一种周期结构,与一些 EBG 结构类似[6]. 一般用交指电容来实现 C_L,但交指电容体积较大,而且设计也比较复杂. 相比起来,贴片电容体积很小,且不再需要复杂的设计. 因此,可以用贴片电容代替交指电容来构造新型的 CRLH-TL.

3 CRLH-TL 的制作和测量

基于 CRLH-TL 理论和周期性 LC 单元网络,结合匹配问题[7],实际设计了一条特征阻抗为 50 Ω 的 5 单元 CRLH-TL. 在设计中,用贴片电容和短路支线分别实现 LH 部分的 C_L 和 L_L,用一段微

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

带传输线实现 RH 部分[8]. 实物照片如图 3 所示,为了减小相邻电感支线间的耦合,把相邻电感交错排列.

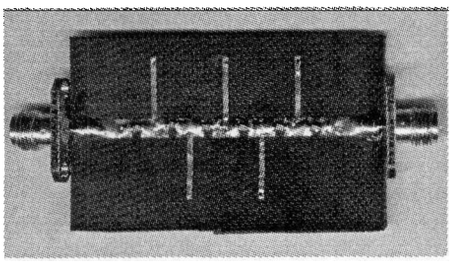

图 3　CRLH-TL 实物图

Fig. 3　Photograph of CRLH-TL

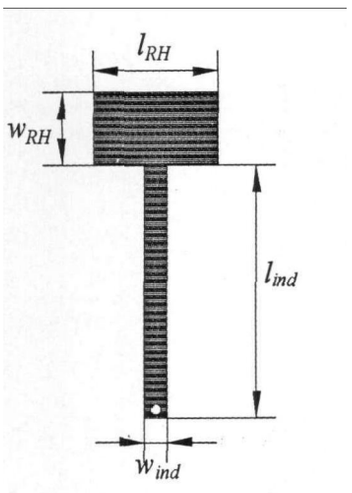

图 4　微带单元具体尺寸

Fig. 4　Layout of unit cell

CRLH-TL 介质板使用 $\varepsilon_r=2.65$,厚度为 $h=1$ mm. 使用了 6 个 0603 的贴片电容(ATC600S),两端的两个电容值为 5.6 pF,中间四个电容值为 1.8 pF. 微带单元具体尺寸如图 4,串联微带线长度为 $l_{RH}=5.14$ mm,宽度为 $w_{RH}=2.78$ mm;电感支线长度为 $l_{ind}=9.47$ mm,宽度为 $w_{ind}=1$ mm,末端过孔接地.

用矢量网络分析仪(Agilent N5230A)对 CRLH-TL 的 S 参数进行测量,并把实验测量结果和仿真结果进行对比,如图 5 所示. 可以看出,由于寄生参数和介质损耗等的影响,测量结果和仿真结果存在一些偏差,但总体来说实验测量结果和仿真结果比较吻合. 从 S 参数的幅度来看,传输线的带宽大约为 1GHz ~ 5GHz;并且在带宽范围内,插入损耗小于 1.3 dB,回波损耗大于 10 dB. 将测得的相位延拓开,由 $\beta=-\phi d$ 便能得到色散曲线. 从色散曲线来分析,当频率为 2.97 GHz 时,CRLH-TL 工作模式出现从 LH 到 RH 的过渡,呈现零相移. 对于本次设计的 CRLH-TL,当频率为 1 GHz ~ 2.97 GHz 时,β 为负值,工作在 LH 模式;当频率为 2.97 GHz ~ 5 GHz 时,β 为正值,工作在 RH 模式.

从上面的实验结果可以看出:与传统交指电容型 CRLH-TL 相比,这种集总参数电容 CRLH-TL,设计方便,结构简单,体积更小,易于实现,并且同样具有良好的性能.

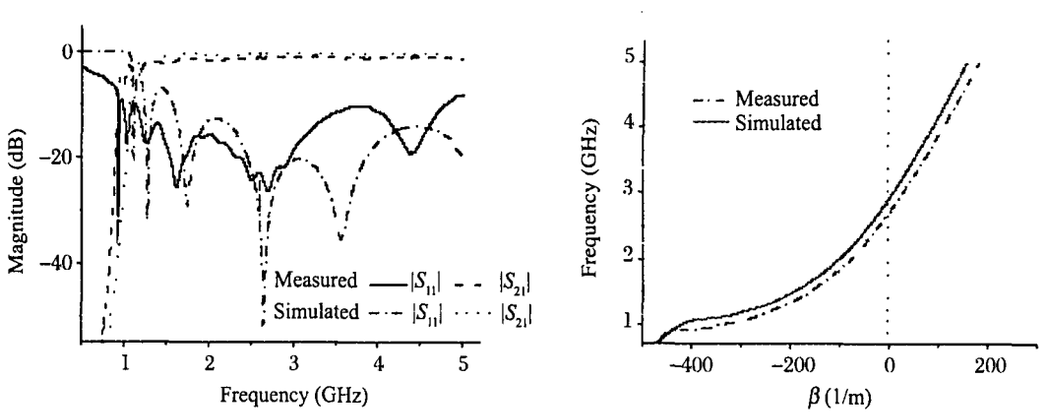

图 5　测量结果和仿真结果对比

Fig. 5　Comparisons between simulations and measurements

4　结　论

本文基于 CRLH-TL 理论和周期性 LC 网络单元,使用贴片电容和短路支线电感,设计并制作了一条 5 单元的 CRLH-TL. 经过实验测量表明,此传输线结构小巧,易于实现,性能良好:带宽为 1GHz ~ 5GHz,插入损耗小于 1.3 dB,回波损耗大于 10 dB. 由于 CRLH 结构的特殊特性,使其可

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

以广泛应用于移相器,耦合器和巴伦等微波器件中,从而减小器件尺寸,提升器件性能.因此,这种CRLH结构具有良好的发展和应用前景.

参考文献:

[1] Shelby R A, Smith D R, Schuhz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. Science, 2001, 292 : 77.

[2] Eleftheriades G V, Siddiqui O, Iyer A K. Transmission line models for negative refractive index media and associated implementations without excess resonators [J]. IEEE Microwave Wireless Compon Lett, 2003, 13 : 51.

[3] Lai A, Caloz C, Itoh T. Composite right/left-handed transmission line metamaterials [J]. IEEE Microwave Magazine, 2004, 5 (3) : 34.

[4] Caloz C, Itoh T. Transmission line approach of left-handed(LH) materials and microstrip implementation of an artificial LH transmission line[J]. IEEE Trans on Antenna and Propagation, 2004, 52 (5) : 1159.

[5] Antoniades M A, Eleftheriades G V. A broadband series power divider using zero-degree metamaterial phase-shifting lines[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005, 15 (11) : 808.

[6] 赵国华,刘长军. 新型紧凑电磁带隙结构在微波合路器中的应用[J]. 四川大学学报:自然科学版,2008,45(2):328.

[7] 刘长军. 射频通信电路设计[M]. 北京:科学出版社,2005.

[8] 范如东,刘长军. 基于CRLH-TL零阶谐振特性的新型串联功分器[J]. 工程设计学报,2008,15(3):213.

[责任编辑:李富河]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net