

# 新型对偶复合左右手传输线电磁特性研究

路成福<sup>1</sup>, 吴国成<sup>1</sup>, 冯存前<sup>1</sup>, 刘超<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051; 2. 陆航驻洛阳地区军代室, 河南洛阳, 471009)

**摘要** 采用缺陷地结构和加载枝节贴片的方法,设计了一种结构简单的新型对偶复合左右手传输线,并深入研究了其电磁特性。采用 Bloch-Floquet 理论和全波仿真软件推导并计算了该结构的色散曲线,理论和仿真结果吻合较好,证明了该结构为对偶复合左右手传输线结构。给出了该结构的等效电路模型,并提取了相应电路结构参数。采用电磁扫描仿真,分析了结构参数的变化对其电磁特性的影响。相对于文献[8~9]中结构,该结构相对简单,参数易于调节;同时,该结构具有对称性,能够更好的应用于微带天线的设计。

**关键词** 对偶复合左右手传输线; Bloch-Floquet 理论; 色散曲线

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.03.012

**中图分类号** TN81 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)03-0050-04

## Electromagnetic Characteristics Research on Novel Dual-Composite Right/Left-Handed Transmission Line

LU Cheng-fu<sup>1</sup>, WU Guo-cheng<sup>1</sup>, FENG Cun-qian<sup>1</sup>, LIU Chao<sup>2</sup>

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Military Representative office of Army Aviation in Luoyang, Luoyang, 471009, Henan, China)

**Abstract:** A novel dual-composite right/left-handed transmission line is proposed in this paper based on the reference [8~9], and its electromagnetic characteristics are investigated. The dispersion curve of the proposed structure has been derived by using Bloch-Floquet theory and simulator, and the D-CRLH is proved. The equivalent circuit model is given, and the extractive parameters of the model are extracted. The influences of the change of the structure parameters on its electromagnetic characteristics are analyzed by Ansoft HFSS10. Compared with the structure in reference [8~9], the proposed structure is simpler, and is easy to adjust in its parameters. What is more, the proposed structure is of symmetrization, and can be used in the design of microstrip antenna.

**Key words:** dual-composite right/left-handed transmission line; bloch-Floquet theory; dispersion curve

自 Veselago 提出“左手材料”的概念以来,该材料就受到了各界的高度关注和深入研究,并被广泛应用于固体物理、材料科学、光学和电磁学等领域<sup>[1-3]</sup>。1996年,英国皇家学院 J.B. Pendry 指出可以用细金属导线阵列构造介电常数为负的人工媒

质<sup>[4]</sup>,1999年他又提出可以用有缝谐振环阵列构造磁导率为负的人工媒质<sup>[5]</sup>,在他的启发下,2001年,美国加州大学圣地亚哥分校的 David Smith 等人第1次构造出介电常数和磁导率同时为负的电磁媒质<sup>[6]</sup>,打开了人工实现左手材料研究的大门,使左手

收稿日期:2013-03-06

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2010JQ8007)

作者简介:路成福(1983-),男,辽宁兴城人,硕士生,主要从事信息系统建模与仿真研究。

E-mail:luchengfu200@163.com

材料的研究进入了崭新的一页。

自 2003 年 Caloz 第 1 次提出了复合左右手传输线(CRLH-TL)<sup>[7-8]</sup>以来它就被广泛应用于结构微波工程设计之中。2006 年 Caloz 在此前研究基础上进一步提出了对偶复合左右手传输线的概念<sup>[9]</sup>。

目前对偶复合左右手传输线的实际电路结构较为少见<sup>[1]</sup>。文献[8~9]分别以不同的缺陷地结构结合微带贴片实现了对偶复合左右手传输线结构,但缺陷地结构较为复杂,调节参数较多,同时设计的结构不具有对称性,应用范围较小。本文在此基础上提出了一种新的具有对称性的结构简单的对偶复合左右手传输线结构,分析了结构参数对其 S 参数的影响,并给出了该结构的色散曲线和电路模型,证明其为对偶复合左右手结构。

### 1 结构模型和仿真分析

结构模型见图 1。图 1(a)为接地板,白色部分为接地板上的缺陷地结构,图 1(b)为介质板上矩形贴片,可以看出该结构具有对称性。2 侧为 50 Ω 微带线,缺陷地结构提供并联的左手电容( $C_L$ )和右手电感( $L_R$ );短截线和矩形贴片提供串联的左手电感( $L_L$ )和右手电容( $C_R$ )。

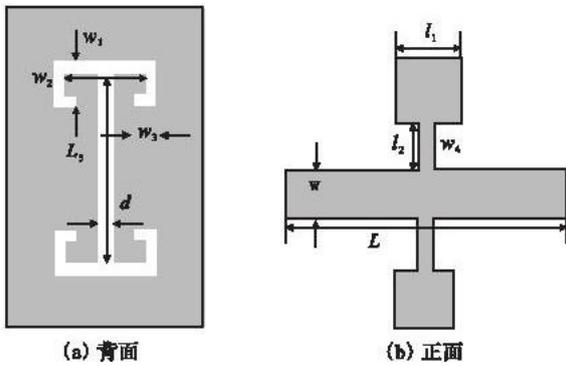


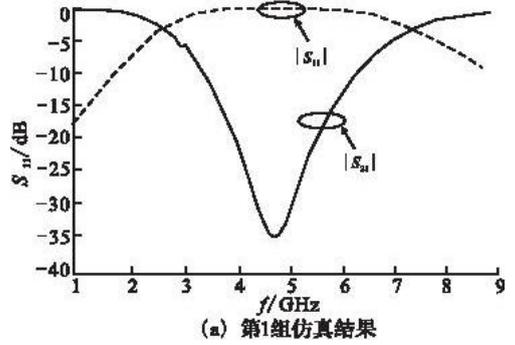
图 1 对偶复合左右手传输线结构  
Fig. 1 The structure of D-CRLH-TL

使用 Ansoft HFSS 软件进行仿真,采用的介质板为 Arlon AD 270,相对介电常数为 2.7,正切角损耗为 0.003,厚度为 1 mm。为了便于分析,给定 2 组参数,见表 1。

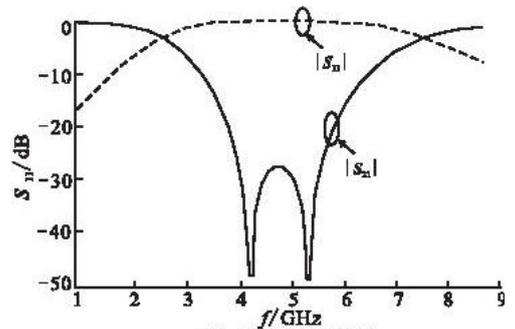
表 1 结构模型的相关参数

| 分组 | L | w | l <sub>1</sub> | l <sub>2</sub> | l <sub>3</sub> | w <sub>1</sub> | w <sub>2</sub> | w <sub>3</sub> | w <sub>4</sub> | d   |
|----|---|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|
| 1  | 6 | 2 | 4              | 4              | 8              | 4              | 1.4            | 0.8            | 0.2            | 0.3 |
| 2  | 6 | 2 | 4              | 4              | 8              | 4              | 1.7            | 0.8            | 0.2            | 0.3 |

在上述参数情况下,对该结构进行全波仿真,得到其频率( $f$ )响应曲线(S 参数)见图 2。



(a) 第 1 组仿真结果



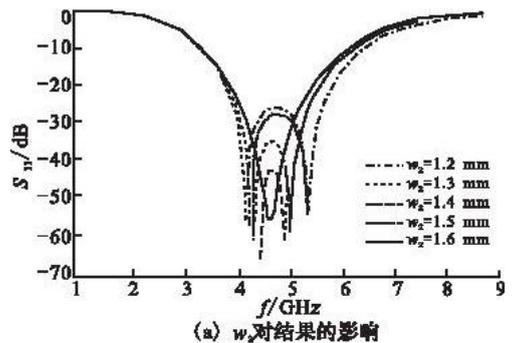
(b) 第 2 组仿真结果

图 2 新结构的 S 参数

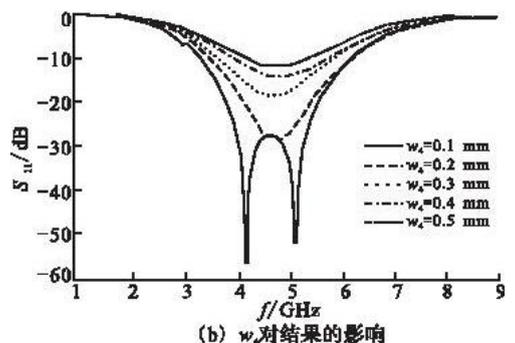
Fig. 2 S-parameters of the new structure of D-CRLH-TL

从图 2 可以看出该单元结构是一个带阻结构。图 2(a)中 S 参数只有一个传输零点(4.85 GHz),处于平衡状态;图 2(b)中 S 参数具有 2 个传输零点(4.45 GHz 和 5.55 GHz),处于非平衡状态。

为深入分析该结构,保持其它参数不变,对其中的一个参数进行扫描仿真。结果见图 3。



(a) w<sub>2</sub>对结果的影响



(b) w<sub>4</sub>对结果的影响

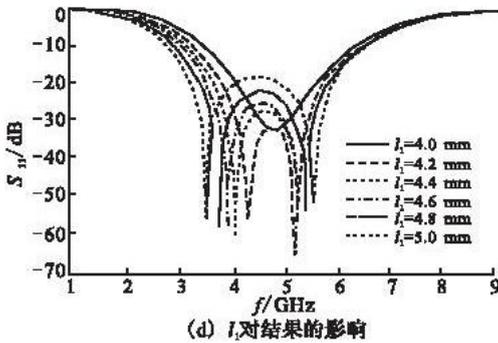
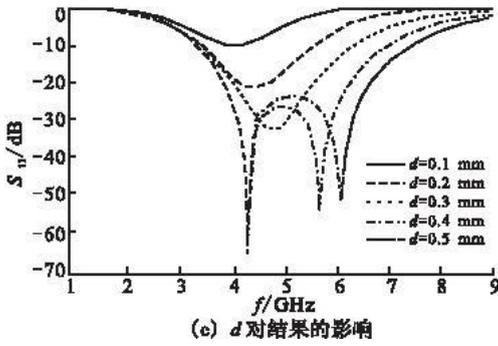


图3 仿真结果

Fig. 3 Simulated results

从图3可知,  $w_2$  的改变会对2个传输零点都有影响,随着  $w_2$  的增大,2个传输零点不断靠近,最后合并,即是单元结构从非平衡状态到平衡状态,调节  $w_2$  的大小可有效控制传输零点的位置;短截线的宽度  $w_4$  主要对阻带的抑制度有影响,当  $w_4 = 0.1$  mm时,阻带抑制度最好,这时2个传输零点比较接近,单元结构处于非平衡状态,随着  $w_4$  的增大,2个传输零点合并,单元结构处于平衡状态,但阻带的抑制度也随之变差; $d$  主要影响高频传输零点,随着  $d$  的减小,高频传输零点逐渐下移,最终与低频传输零点合并,而低频传输零点几乎不受影响;正方形贴片的边长  $l$  主要影响低频传输零点,随着  $l$  的减小,低频传输零点逐渐上移,最终与高频传输零点合并,而高频传输零点的位置受到的影响较小。

## 2 色散特性

根据理论可知,对偶复合左右手传输线的色散曲线为非线性,其中包括2个右手频段和一个左手频段。为进一步计算出其色散曲线,证明本文中结构为对偶复合左右手传输线结构,由 Bloch-Floquet 理论,可知<sup>[10]</sup>:

$$\beta(\omega) = \left( \frac{1}{d} \right) \arccos \left( 1 + \frac{ZY}{2} \right) \quad (1)$$

由于实际中不能直接计算,需要先将  $Z$  和  $Y$  用  $S$  参数表示出来,可得:

$$Z_{11} = Z_{c1} \frac{1 - |S| + S_{11} - S_{22}}{|S| + 1 - S_{11} - S_{22}} \quad (2)$$

$$Z_{12} = \sqrt{Z_{c1} Z_{c2}} \frac{2S_{12}}{|S| + 1 - S_{11} - S_{22}} \quad (3)$$

$$Z_{12} = \sqrt{Z_{c1} Z_{c2}} \frac{2S_{21}}{|S| + 1 - S_{11} - S_{22}} \quad (4)$$

$$Z_{22} = Z_{c2} \frac{1 - |S| - S_{11} + S_{22}}{|S| + 1 - S_{11} - S_{22}} \quad (5)$$

又因为本文中单元结构为对称结构,可知2端特性阻抗  $Z_{c1} = Z_{c2}$ ,即  $S_{11} = S_{22}$ ,并且该结构为无耗互易结构,则有  $S_{12} = S_{21}$ ,故式(2)~(5)简化为:

$$Z_{11} = Z_{22} = Z_{c1} \frac{1 - |S|}{|S| + 1 - 2S_{11}} \quad (6)$$

$$Z_{12} = Z_{21} = Z_{c1} \frac{2S_{21}}{|S| + 1 - 2S_{11}} \quad (7)$$

将所提出的结构等效为对称 T 型网络,则有:

$$Z_1 = Z_{11} - Z_{12} \quad (8)$$

$$Z_2 = Z_{12} = Z_{21} \quad (9)$$

综合上式,可得:

$$\beta(\omega)d = \arccos \left( 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right) \quad (10)$$

将处于平衡状态下单元结构的  $S$  参数代入可计算得到其色散曲线,见图4。

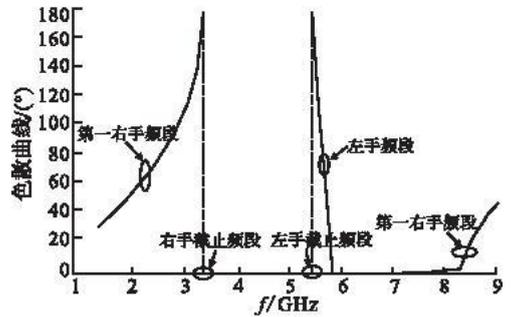


图4 色散曲线

Fig. 4 The dispersion curves of D-CRLH-TLL

从图4可知,单元结构具有2个右手频段和1个左手频段。在第1个右手频段和左手频段之间有1个阻带(右手截止频率为3.55 GHz,左手截止频率为5.55 GHz),单元结构在5.55 GHz到5.90 GHz为左手频段。

## 3 等效电路模型

通过对单元结构的色散特性进行分析,可知该结构为对偶复合左右手传输线单元结构。在此基础上,给出单元结构的等效电路模型,见图5。

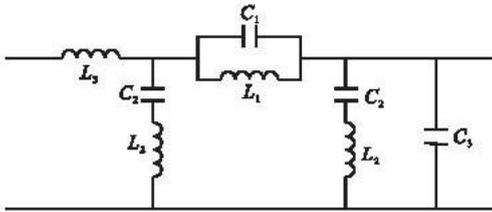


图 5 D-CRLH TL 单元结构等效电路模型

Fig. 5 The equivalent circuit model of D-CRLH-TL

采用电路仿真软件 Serenade 的优化拟合工具提取等效电路模型各元件参数的值,结果见表 2。

表 2 等效电路模型的元件参数

Tab. 2 Parameters of the equivalent circuit model

| $C_1 / \text{pF}$ | $C_2 / \text{pF}$ | $C_3 / \text{pF}$ | $L_1 / \text{nH}$ | $L_2 / \text{nH}$ | $L_3 / \text{nH}$ |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 4.08              | 14.41             | 2.23              | 13.03             | 0.52              | 0.03              |

对文中结构进行实物加工和测试,图 6 为实物图,图 7 为实测和仿真结果。

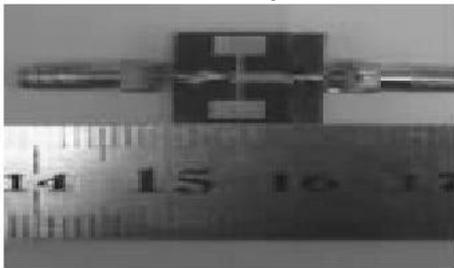


图 6 实物照片

Fig. 6 The photograph of fabricated D-CRLH-TL

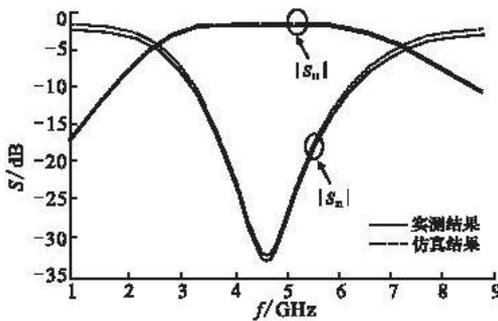


图 7 仿真和实测结果

Fig. 7 Simulated and measured results

从图 7 可知,实测结果和仿真结果吻合较好,进一步证明了本文所设计的结构为对偶复合左右手传输线结构。

## 4 结语

本文设计了一种结构简单具有对称性的对偶复合左右手传输线单元。使用全波仿真软件分析了该结构的主要参数对其频率响应曲线的影响,并使用 Bloch-Floquet 理论计算出其色散曲线,证明其为对偶复合左右手结构。最后给出了等效电路模型并提取了相应的元件参数,实测和仿真结果吻合较好,证

明了设计的有效性。由于该结构具有对称性,可用于天线的设计,应用范围更广泛。

## 参考文献(References):

- [1] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$  [J]. Sov phys usp, 1968, 44: 509-514.
- [2] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. Phys rev lett, 1996, 76 (25): 4773-4776.
- [3] Lai A, Itoh T, Caloz C. Composite right/left-handed transmission line met materials [J]. IEEE microwave magazine, 2004(5): 34-50.
- [4] Caloz C. dual composite right/left-handed (D-CRLH) transmission line metamaterial [J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2006, 16(11): 585-587.
- [5] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. IEEE trans microwave theory tech, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [6] Smith D R, Willie I P, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. Phys rev lett, 2000, 84 (18): 4184-4187.
- [7] George V, Eleftheriades, Ashwin K Iyer, et al. Planar negative refractive index media using periodically l-c loaded transmission lines [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2002, 50 (12): 2702-2712.
- [8] 杜国宏, 唐小宏, 肖飞. 基于 D-CRLH 传输线的带阻滤波器[J]. 微波学报, 2011, 21(1): 64-70. DU Guohong, TANG Xiaohong, XIAO Fei. Design of bandstop filter based on dual composite right/left-handed transmission line [J]. Journal of microwave, 2011, 21(1): 64-70. (in Chinese)
- [9] Ryu Y H, Park J H, Lee J H, et al. DGS dual composite right/left handed transmission line [J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2008, 18 (7): 434-436.
- [10] 逯科. 新型超材料单元设计及其在微波工程中的应用研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2012. LU Ke. Investigation into the design of novel metamaterial cells and their application in microwave engineering [D]. Xian: Air force engineering university, 2012. (in Chinese)

(编辑:田新华)