

新型平面复合左右手传输线电磁特性研究

曾会勇, 王光明, 耿林, 韦道知, 曾宪峰
(空军工程大学防空反导学院, 陕西三原, 713800)

摘要 提出了一种新型平面传输线型左手材料,并深入研究了其电磁特性。通过 Bloch - Floquet 理论推导了新型结构的色散曲线,通过色散曲线证明其为传输线型左手材料;提出了新型复合左右手传输线的等效电路模型,分别提取了平衡条件和非平衡条件下等效电路模型的参数值,由等效电路模型和电磁仿真得到的散射参数基本一致,证明了所提等效电路模型的正确性。提出的新型复合左右手传输线是平面结构,易于加工,且不需要缺陷地面结构,便于实际应用。

关键词 左手材料;复合左右手传输线;平衡条件

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.03.007

中图分类号 TN81 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)03-0030-05

Veselago^[1]于1968年提出左手材料的概念,但由于自然界中不存在介电常数和磁导率均为负的材料,左手材料一直未受到重视。1996年,Pendry提出了用金属细导线和开口谐振环组成的周期结构实现同时为负的介电常数和磁导率^[2]的理论。Smith等人通过实验证实了Pendry的设想,首次人工合成了左手材料^[3],并由此引发了左手材料的研究热潮。

目前,研究左手材料所要解决的主要问题是左手材料的理论研究和实验应用研究。现已出现了大量的左手材料,概括起来主要有:一是基于金属线(电谐振器)和磁谐振器的左手材料^[4-5],二是基于金属结构的平面左手材料^[6],三是基于L-C等效回路的传输线型左手材料(即复合左右手传输线)^[7-8]。其中,前2种实现方法采用的是金属谐振结构,往往损耗较大、频带较窄、色散强烈且难以制作,因此很难在工程实践中加以运用。而传输线型左手材料,以L-C等效电路模型为基础,其等效结构由传统的传输线电路模型的对偶电路获得,不是金属谐振结构,故该模型较以前提出的金属谐振模型具有损耗小和易于加工等优点,易于在微波电路中应用。

根据复合左右手传输线(Composite Right/Left-Handed Transmission Line, CRLH-TL)理论^[8],CRLH-TL同时具有左手传输线和右手传输线的特点,且有2个传输通带,在低频时电磁波在其中传播的相速度与群速度方向相反,相位不断超前,表现出左手特性;而在高频时电磁波在其中传播的相速度与群速度方向相同,相位不断滞后,表现出右手特性。CRLH-TL的色散关系是双曲-线性的,在平衡条件下,左手通带和右手通带连接在一起,二者中间有一个相位常数 β 为零的频点;在非平衡条件下,左手通带和右手通带之间存在一个不能传播的“禁带”。无论是平衡条件还是非平衡条件的CRLH-TL,在其本身的2个通频带内传输损耗都比较小,因而能够很好地应用于微波和毫米波器件的设计。

构造CRLH-TL,一般有2种实现方式:第1种是利用集总参数元件来实现,如SMT元件^[7];第2种是基于传输线的分布参数效应来实现^[8]。第2种方式又可分为2类:一类是基于等效方式实现的结构,如CS-RR^[9]及其衍生结构,这类方式不是很直观;另一类是采用较直观分布参数元件,如交指缝隙电容和短路支节电感等^[10]。其中,基于集总参数的CRLH-TL只能应用于微波低频段,而传统的基于CSRR及其衍生结

* 收稿日期:2011-11-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60971118)

作者简介:曾会勇(1985-),男,河南淮阳人,博士生,主要从事天线、电磁兼容与电波传播,左手传输线等研究。

E-mail:hyzeng.1023@163.com

构的 CRLH - TL 需要在接地面上刻蚀图形,这就影响了此类 CRLH - TL 的应用,因此设计新型平面 CRLH - TL,研究其特性,探索其应用就显得很有意义。

本文提出一种新型平面 CRLH - TL 结构,该结构不需要缺陷地面结构,而是用金属化接地过孔提供负介电常数效应,微带线间隙提供负磁导率效应。通过色散曲线证明了其为 CRLH - TL,研究了结构参数对其 S 参数的影响,提出了结构的等效电路模型。

1 结构模型

提出结构的模型见图 1,其中深色为金属导体,白色为腐蚀部分。从图 1 可以看出,该结构为对称结构,两侧是 50 Ω 微带线,紧靠微带线的一对开路枝节与中间矩形导体之间的缝隙等效为串联电容,提供负磁导率效应;半径为 r 的金属化接地过孔等效为并联电感,提供负介电常数效应。

在仿真软件 Ansoft Designer 中建立模型,文中介质板均采用相对介电常数为 2.65,厚度为 1.5 mm 的聚四氟乙烯玻璃布板(F4B - 2)。为便于分析和对比,给出 2 组参数:参数 I 和参数 II,见表 1。

表 1 参数 I 和参数 II

Tab. 1 Parameter I and parameter II														mm		
分组	w	l	d	l ₁	d ₁	l ₂	d ₂	l ₃	d ₃	w ₁	w ₂	w ₃	w ₄	r	x	y
I	4.1	1	6.1	11	0.5	10	1.8	8	3.1	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5	2.3	4.75
II	4.1	1	5.6	11	0.5	10	1.55	2.5	1	0.25	0.25	3.25	1.3	0.5	1.65	4.25

在参数 I 和参数 II 这 2 种情况下,得到的频率(f) 响应曲线(S 参数) 仿真结果分别见图 2(a) 和图 2(b)。从图 2(a) 中可以看出,S 参数有 2 个反射零点(3.44 GHz 和 3.60 GHz),且 2 个反射零点相邻;从图 2(b) 可以看出,S 参数仍然有 2 个反射零点(3.68 GHz 和 4.88 GHz),但这 2 个反射零点出现了分离。



图 2 新型结构 S 参数仿真结果

Fig. 2 Simulated parameter S results of the novel structure

为深入分析该结构,保持参数 I 和参数 II 不变,对去掉金属化过孔(即 r = 0) 的结构进行仿真,得到的 S 参数结果见图 3。从图 3(a) 可以看出,S 参数只剩 1 个反射零点(3.66 GHz),这与图 2(a) 中第 2 个反射零点(3.60 GHz) 几乎位于同一位置,由此推测第 1 个反射零点是由接地过孔和缝隙电容产生的左手通带,第 2 个反射零点是由腐蚀缝隙产生的谐振回路,为右手通带,由 CRLH - TL 理论可知,这里的左手通带和右手通带靠得很近,形成了平衡结构的 CRLH - TL;从图 3(b) 可以得出相似结论,即 S 参数也只剩一个反射零点(4.85 GHz),这与图 2(a) 中第 2 个反射零点(4.88 GHz) 几乎位于同一位置,只不过此时左手通带和右手通带分离,形成了非平衡结构的 CRLH - TL。

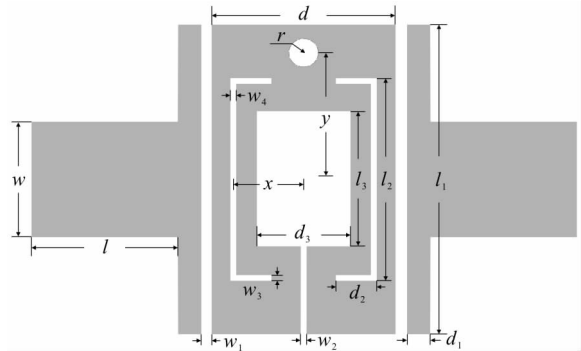


图 1 新型结构模型

Fig. 1 Novel structure model



图3 去接地孔后 S 参数仿真结果

Fig. 3 Simulated parameter S results without via hole

2 色散曲线

CRLH - TL 的色散关系($\beta - \omega$ 曲线或 $f - \omega$ 曲线)是非线性的,既有右手传输线的线性部分,又有左手传输线的双曲线部分,因而称之为“双曲 - 线性”色散关系。通过前面的仿真分析,推测该结构为 CRLH - TL,但具体判断标准应是色散曲线。均匀 CRLH - TL 在自然界并不存在,但在一定频率范围内,若导波波长比结构的不连续大得多时,可认为传输线是均匀的。实用中,如果单元的物理长度不大于 $1/4$ 波导波长(λ_g),CRLH - TL 可认为是足够均匀的。参数 I 时,单元物理长度为 9.5 mm,高端反射零点(3.6 GHz)对应的 $1/4\lambda_g = 12.8$ mm;参数 II 时,单元物理长度为 9.1 mm,高端反射零点(4.88 GHz)对应的 $1/4\lambda_g = 9.4$ mm,因此可认为该结构是均匀的。

由 Bloch - Floquet 理论,可知:

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

实际上不能直接运用式(1)计算,因为能直接获得的是 S 参数,首先要将 S 参数转化成 Z 参数:

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

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

由于所提出结构为对称结构,且端接的传输线的特性阻抗 $Z_{c1} = Z_{c2}$,所以有 $S_{11} = S_{22}$,同时是无耗互易网络,则 $S_{12} = S_{21}$,因此,式(2)可以简化为:

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

$$Z_{12} = Z_{21} = Z_{c1} \frac{2S_{21}}{|S| + 1 - 2S_{11}} \quad (3b)$$

将所提结构等效为一对称 T 型网络,见图 4。

则有:

$$Z_1 = Z_{11} - Z_{12} \quad (4a)$$

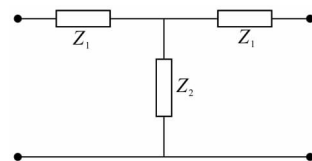


图4 T 型等效网络

Fig. 4 T shaped equivalent network

$$Z_2 = Z_{12} = Z_{21} \quad (4b)$$

联系式(1),则有:

$$\beta(\omega) d = \arccos\left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right) \quad (5)$$

联立式(3) - (5),即可计算所提出 CRLH - TL 的色散曲线。根据式(5),得出新结构在参数 I 和参数 II 时的色散曲线,见图 5。



图5 结构的色散曲线

Fig.5 Dispersive curve of structure

从图5(a)可以看出,在3.58 GHz附近,结构的 $\beta = 0$,不存在阻带,表明此时结构是CRLH-TL,并且是平衡结构,在3.58 GHz处CRLH-TL由左手传输通带向右手传输通带过渡;从图5(b)中可以看出,结构在小于3.9 GHz的频带范围表现为左手传输特性,而在大于4.7 GHz的频率范围表现为右手传输特性,在3.9 GHz与4.7 GHz之间, β 为虚数,出现阻带,表明此时结构是CRLH-TL,并且是非平衡结构。

3 等效电路模型

通过色散曲线证明了所提结构为CRLH-TL,并且在参数I和参数II时分别表现为平衡结构和非平衡结构。在此基础上,提出了新型CRLH-TL的等效电路模型,见图6。并在参数I(平衡条件)和参数II(非平衡条件)下提取了等效电路的参数值。

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

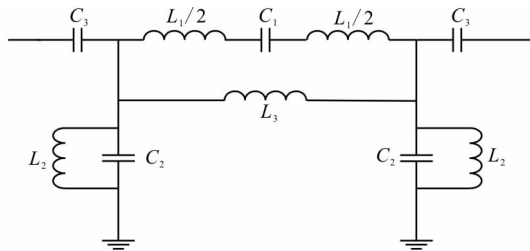


图6 新型CRLH-TL的等效电路模型

Fig.6 Equivalent circuit model of novel CRLH-TL

表2 等效电路模型的提取参数

Tab.2 Extractive parameters of equivalent circuit model

分组	C_1/pF	C_2/pF	C_3/pF	L_1/nH	L_2/nH	L_3/nH
平衡条件	0.72	2.57	0.45	26.32	0.75	14.88
非平衡条件	1.51	1.03	0.24	12.14	1.50	5.90

对结构进行了实物测试,测试结果、仿真结果和电路模型结果见图7,从图7可以看出,在平衡条件和非平衡条件下, S 参数仿真结果与等效电路模型结果趋势一致,拟合良好,证明了所提等效电路模型的正确性;测试结果和仿真结果一致,证明了所提方法的有效性。

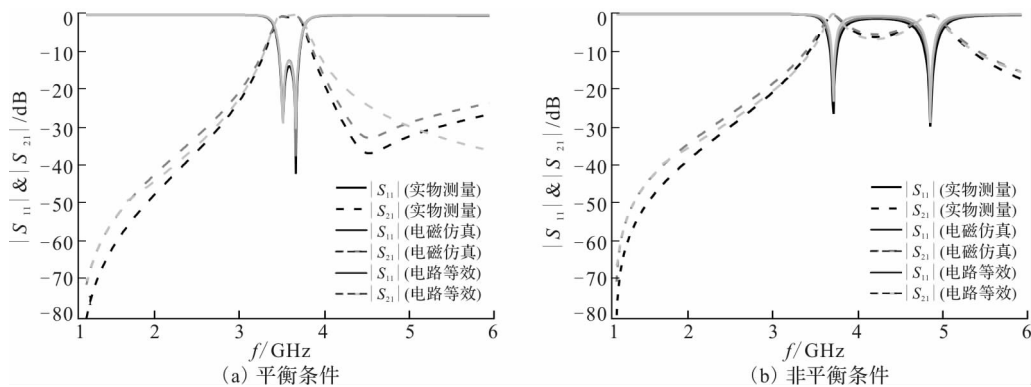


图7 S参数测试结果、仿真结果和电路模型结果

Fig.7 Measured, simulated and circuit model results of parameter S

4 结束语

本文主要分析了一种新型平面 CRLH - TL 的电磁特性。运用 Bloch - Floquet 理论详细推导了色散曲线的计算方法,证明了该结构是 CRLH - TL;提出了新型 CRLH - TL 的等效电路模型,通过比较等效电路模型结果和电磁仿真结果证明了所提等效电路模型的正确性;本文所提出的设计原理对于平面传输线型左手材料具有重要的指导意义。

参考文献(References):

- [1] Veselago V G, The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet physics uspekhi, 1968, 10(4):509 - 514.
- [2] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J], IEEE transactions on microwave theory and techniques, 1999, 47(11):2075 - 2084.
- [3] Smith D R, Willie J. Padilla, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. Physical review letters, 2000, 84(18):4184 - 4187.
- [4] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. Science, 2001, 292(6):77 - 79.
- [5] Tang Mingchun, Xiao Shaoqiu, Deng Tianwei, et al. Miniaturized electric resonance metamaterial [J]. Acta physica sinica, 2010, 59(7):4715 - 4719.
- [6] Wang Jiafu, Qu Shaobo, Xu Zhuo, et al. Planar left - handed metamaterials based on double split - ring resonator pairs [J]. Acta physica sinica, 2009, 58(5):3224 - 3229.
- [7] Eleftheriades George V, Iyer Ashwin K, Kremer Peter C. 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] Caloz C, Itoh T. Transmission line approach of left - handed (LH) materials and microstrip implementation of an artificial LH transmission line [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2004, 52(5):1159 - 1166.
- [9] Falcone F, Lopetegi T, Laso M A G, et al. Babinet principle applied to the design of metasurfaces and metamaterials [J]. Physical review letters, 2004, 93(19):197401.
- [10] Sanada Atsushi, Caloz Christophe, Itoh Tatsuo. Planar distributed structures with negative refractive Index [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2004, 52(4):1252 - 1263.

(编辑:田新华)

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

ZENG Hui - yong, WANG Guang - ming, GENG Lin, WEI Dao - zhi, ZENG Xian - feng
(School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China)

Abstract: A novel planar transmission - line style of left - handed metamaterial is proposed, and its electromagnetic characteristics are investigated. The dispersion curve of the proposed structure has been derived by using Bloch - Floquet theory and the CRLH TL is proved. Then the equivalent circuit model of the CRLH TL unit is provided, the parameters of the equivalent circuit model are extracted under balanced and unbalanced conditions by optimizing and synthesizing. The model is validated by comparing the circuit result with the simulator result. The novel planar transmission - line style of the left - handed metamaterial does not need defected ground structure, so it can be easily designed and fabricated.

Key words: left - handed metamaterial; composite right/left - handed transmission line; balanced condition