

文章编号 1005-0388(2012)06-1136-05

X 型超宽带复合左右手传输线设计与仿真

张洪欣^{1,2} 许媛媛¹ 杨 晨¹ 徐 楠¹ 黄丽玉¹

(1. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876;

2. 安全生产智能监控北京市重点实验室(北京邮电大学), 北京 100876)

摘 要 基于 X 型金属结构, 提出了一种超宽带复合左右手传输线材料结构单元, 该结构单元由介质板及其两侧反向对称的 X 型金属结构组成。从分布参数电路理论角度对材料单元的左右手特性成因进行了定性分析; 利用等效参数提取法, 通过 S 散射参数提取了该结构单元的相对介电常数和相对磁导率, 并结合折射率进一步验证了这种左右手传输线材料的传输特性。仿真结果表明, 在电磁波平行于介质板入射的情况下, 该结构单元同时存在左右手频带, 在 S 波段表现出超宽带的左手特性, 并且在其他多频点处得到了零折射率, 从而构造了一种正-零-负复合媒质材料。

关键词 X 型结构; 复合左/右手传输线; 超宽带; S 频段

中图分类号 TN015

文献标志码 A

Design and simulation of an X-type ultra-wideband composite left/right handed transmission line

ZHANG Hongxin^{1,2} XU Yuanyuan¹ YANG Chen¹XU Nan¹ HUANG Liyu¹

(1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 2. Beijing Key Laboratory of Work Safety Intelligent Monitoring, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China)

Abstract Based on the X-type metal structure, a unit cell of composite left/right-handed transmission line(CRLH-TL)with ultra-wideband is proposed. The unit cell is composed of a dielectric-slab and the X-type metal structures reverse symmetrically set on both sides of the slab. The distribution parameters circuit theory is used to analyze the cause of the left and right-handed properties of the material in general, and the effective parametric extraction method is used to extract the relative permittivity and relative magnetic permeability from the S parameters of the structural unit. Furthermore, the refractive index is also computed to validate the transmission characteristics of the CRLH-TL. The Simulation results demonstrate that the structural units could give rise to both right-handed and left-handed pass-band in the case of an electromagnetic wave paralleled incidents on the dielectric-slab. It also shows ultra wideband characteristics in the S-frequency band; meanwhile, it could get zero refractive index at other frequency points. A positive-zero-negative composite medium

收稿日期: 2012-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(60871081, 61072136); 北京市自然科学基金(4112039)

联系人: 张洪欣 E-mail: hongxinzhang@bupt.edu.cn

material is constructed.

Key words X-type structure; CRLH-TL; UWB; S-band

引 言

自从 1968 年, Veselago 提出了同时具有负介电常数和负磁导率的左手材料的概念^[1]以来, 左手材料的研究在科学界得到了越来越多的关注。传统谐振器型结构左手材料存在频带窄、损耗大的缺点, 极大地限制了其在微波器件、天线等方面的应用^[2], 2002 年 Caloz 和 Itoh 提出了用传输线理论来构造左手介质的思想方法, 称之为复合左右手传输线(CRLH-TL)^[3]它具有低损耗、宽频带的特点, 可以广泛应用于微波电路^[4]。复合左右手传输线的突出特点为: 当电磁波在该传输线中传播时, 传播特性在某个频率范围内呈现“左手特性”(介电常数和磁导率均为负), 在其他频段内呈现“右手特性”(介电常数和磁导率均为正)。

基于 X 型金属结构, 提出了一种复合左右手传输线材料结构单元, 该结构单元由介质板及其两侧反向对称的 X 型金属结构组成。与传统基于叉指结构微带线的复合左右手传输线相比, 该结构单元具有频带宽、结构简单并易于制作等优点。除此之外, 得益于谐振环结构的设计, 实现了极少出现于 S 波段的超宽带左手频带。通过 NRW (Nicolson-Ross-Weir) 参数提取方法^[5-8], 获得了该结构单元的等效介电常数 ϵ 和等效磁导率 μ , 并结合折射率特性进一步验证了左手频段的存在, 以及复合左右手传输线的特性。

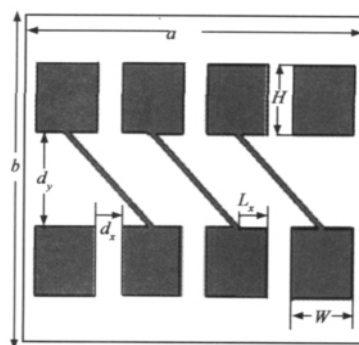
1 理论分析

1.1 X 型复合传输线结构设计

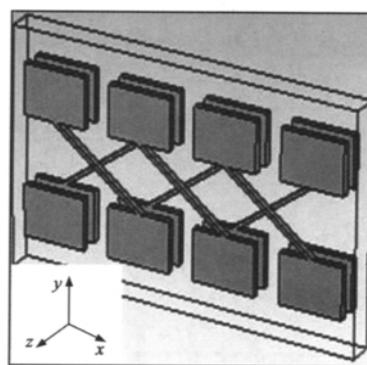
设计一定的单元结构可以实现复合左右手传输线, 从而得到其中电磁波传播时的“左手”特性和“右手”特性。连续金属丝及类似结构可以在电等离子体频率以下实现负等效介电常数; 而开口环路结构单元可以形成磁谐振回路, 并且磁谐振频率要低于电等离子体频率^[9], 从而实现负等效磁导率。

本文所设计的反向对称 X 型结构如图 1 所示, 介质板两面的结构单元反对称放置。图 1(a) 为俯视图, 图 1(b) 为侧视图。其中的中间金属条倾斜放置, 介质基板长度 $a = 12 \text{ mm}$, 宽 $b = 7 \text{ mm}$, 厚度 1 mm ; 金属板宽 $W = 3.5 \text{ mm}$, 长 $H = 2.5 \text{ mm}$, $L_x =$

1.25 mm , $d_x = 2 \text{ mm}$, $d_y = 4 \text{ mm}$, 其中金属线与金属片相交的长度为 1 mm , 介电常数为 9.8 。在图 1 中, 所有金属条厚度均为 0.02 mm 。



(a) X 型结构的俯视图



(b) X 型结构的侧视图

图 1 X 型结构图

1.2 基于传输线理论的谐振特性分析

传输线理论实际上是分布参数电路理论。常规介质和左手材料均可以等效为一个传输线模型^[9-11]。本文的结构单元可以利用等效电路理论来解释, 如图 2 所示。图 1 中的面耦合结构可在较小面积的电路实现较大电容, 并可避免高频多模谐振。因此, 前后两片金属片可以组成等效电容, 金属线可以视为等效电感, 前后金属线中间相互重叠部分等效为电容, 并且前后反向的金属线之间有互感。

图 2 中 C 是指介质板前后相对的两个 X 型金属板之间的耦合电容; L 是指中间倾斜部分 X 型金属条的分布式电感; C_{12} 为 X 型金属条中间倾斜且相互重叠部分的耦合电容; L_{12} 为反对称 X 型金属条之间的等效互感。

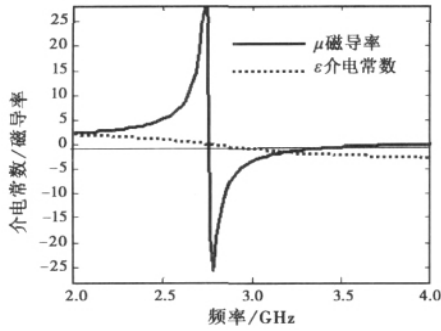


图2 X型结构等效电路图

为了分析复合左右手传输线材料的谐振特性,图3中给出了类比于LC级联单元模型及其串并联谐振的结构单元模型。其中: L_R 为串联电感; C_R 为双导线的并联电容; L_L 为并联电感; C_L 为双导线的串联电容。

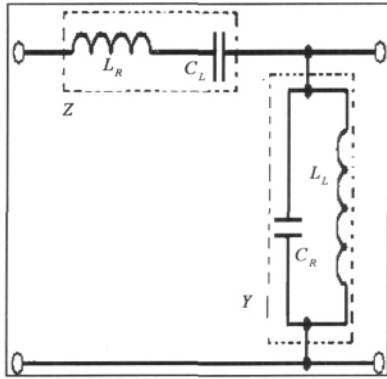


图3 复合左右手传输线的LC级联单元模型

图3中单元模型的阻抗和导纳分别为

$$Z = j\left(\omega L_R - \frac{1}{\omega C_L}\right) = j \frac{(\omega/\omega_{se})^2 - 1}{\omega C_L} \quad (1)$$

$$Y = j\left(\omega C_R - \frac{1}{\omega L_L}\right) = j \frac{(\omega/\omega_{sh})^2 - 1}{\omega L_L} \quad (2)$$

其中串、并联谐振频率为

$$\omega_{se} = \frac{1}{\sqrt{L_R C_L}} \quad (3)$$

$$\omega_{sh} = \frac{1}{\sqrt{L_L C_R}} \quad (4)$$

同理可求得图2中结构的串、并联谐振频率为

$$\omega_{se} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5)$$

$$\omega_{sh} = \frac{1}{\sqrt{L_{12} C_{12}}} \quad (6)$$

在非平衡情况下,无损耗的复合左右手传输线

的特征阻抗条件为

$$Z_C[0 < \omega < \min(\omega_{se}, \omega_{sh})] \in R \text{ (LH 通带)} \quad (7)$$

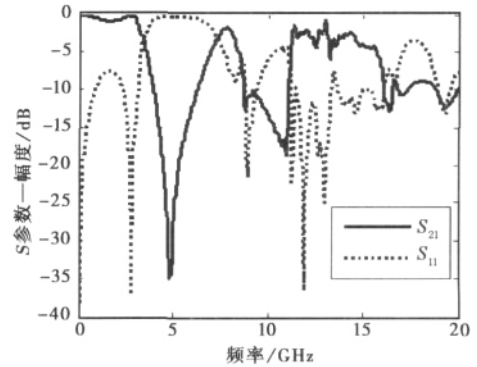
$$Z_C[\min(\omega_{se}, \omega_{sh}) < \omega < \max(\omega_{se}, \omega_{sh})] \in I \text{ (禁带)} \quad (8)$$

$$Z_C[\omega > \max(\omega_{se}, \omega_{sh})] \in R \text{ (RH 通带)} \quad (9)$$

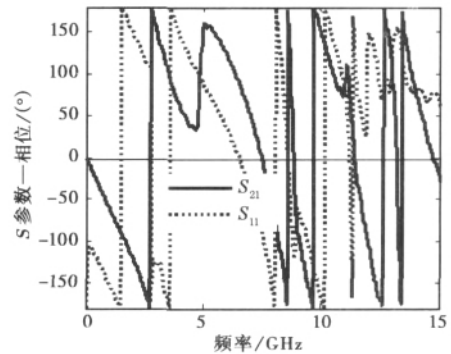
调节X型结构参数使满足上述关系即可实现复合左右手传输线。

2 仿真结果分析

利用三维电磁仿真软件(CST MWS)对X型结构进行了电磁性能仿真。在电磁波平行入射,即电磁波沿 x 方向入射(如图1标示)的情况下,在结构单元的 y 方向设置PEC(理想电边界), z 方向设置PMC(理想磁边界),激励源使用波导端口或平面波。电磁波在单负材料中能量只能以倏逝波的形式传播,通常观察 S_{21} 的-10 dB带宽来分析其通带情况。通过仿真得到的X型结构 S 参数的幅度分布和相位分布如图4(a)、4(b)所示。



(a) S参数幅度



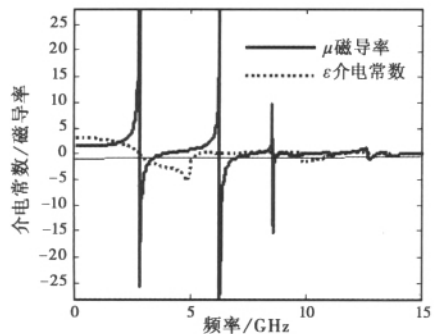
(b) S参数相位图

图4 复合左右手传输线材料的S参数

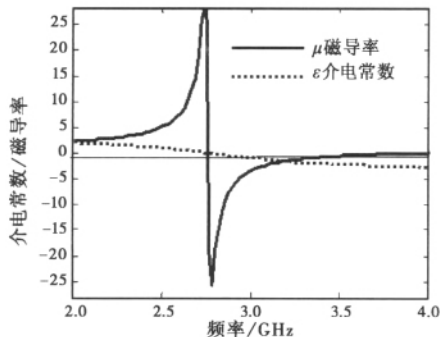
由图4,根据-10 dB带宽,可以清晰地观察到复合左右手传输线材料的传输信号存在多个通频带。下面利用等效参数提取的方法来分析各个通带

的性质。

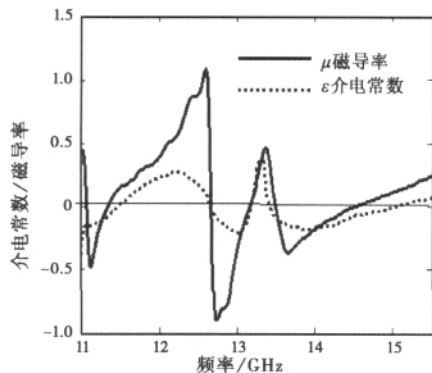
图 5(a)、5(b)、5(c)、5(d)分别为利用 NRW 方



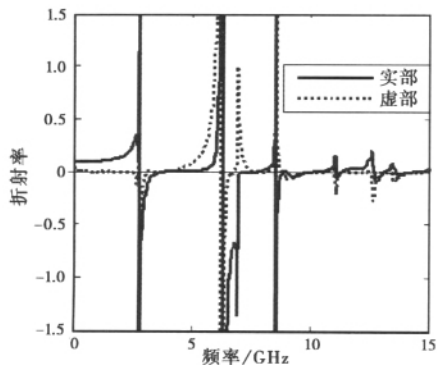
(a) 0~15 GHz 等效介电常数 ϵ 和等效磁导率 μ



(b) 2~4 GHz 等效介电常数 ϵ 和等效磁导率 μ



(c) 11~16 GHz 等效介电常数 ϵ 和等效磁导率 μ



(d) X型结构的折射率

图5 等效参数提取

法,通过 Matlab 仿真提取的等效介电常数 ϵ 和等效磁导率 μ 的实部及折射率 n 。

左手材料符合逆斯涅耳定律,即其折射率为负。右手材料折射率为正。由图 5(d)可以清晰地看到折射率有多个过零点。

在电磁波平行于介质板入射的情况下,根据图 5(b)、5(d),在 S 波段表现出左手特性,即等效介电常数 ϵ 和等效磁导率 μ 均为负值,并且折射率 n 的实部小于零。在 2.75 GHz 谐振频点处有 0.62 GHz 以上的左手带宽,相对带宽为 22.5%,呈超宽带性质。根据图 5(a)、5(d),在 7.5 GHz 处出现右手通带,其 ϵ 和 μ 均为正值, n 大于零。根据图 5(c)、5(d),在 11.07~16.09 GHz 频段为左右手通带,相对带宽为 37.1%,其中包括 11.07~11.34 GHz, 12.64~13.14 GHz, 13.38~14.52 GHz 的左手频段,其余为右手频段,并且在该情况下于多处得到了零折射率,验证了该 X 型金属结构的左右手传输线特性。由于在谐振频点处,金属环在周围空气中易发生二次电磁场谐波,并且 NRW 参数提取法并不是极度精确,故仿真结果与实际情况会有一定偏差。

在电磁波沿 x 轴方向入射的情况下,利用 CST MWS 的场监视器功能,可以检测谐振频率下该结构的表面电流分布如图 6(见 1262 页)所示。可以清晰地看到表面电流在前后平面的 X 型结构中的流向。前后平面 X 型结构相互耦合构成了两个电流旋向相同的谐振环路。

3 结 论

利用反对称 X 型结构,设计了一种新型的复合左/右手传输线材料单元。对该结构单元进行理论分析,等效电路建模, CST 仿真以及等效电磁参数提取等,分析和验证了该材料单元的右手和左手通带特性。仿真结果表明,电磁波平行入射时,分别在 S 频段得到了 2.78~3.4 GHz 的超宽带左手频段。更构造了一种结构简单,折射率满足正-零-负条件,频段为 11.07~16.09 GHz 新型的超宽带复合左右手传输线材料。

参考文献

- [1] VESELAGO V G. The Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Sov Phys-Usp, 1968, 10(4): 509-514.
- [2] LIU L, CALOZ C, CHANG C, et al. Forward coupling phenomenon between artificial left-handed trans-

- mission lines[J]. J Appl Phys, 2002, 92(9): 5560-5565.
- [3] CALOZ C, SANADA A, ITOH T. A novel composite right/left-handed coupled-line directional coupler with arbitrary coupling level and broad bandwidth[J]. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, 2004, 52(3): 980-992.
- [4] 张安学, 范世毅, 蒋延生, 等. 基于左右手复合传输线的威尔金森功分器[J]. 电波科学学报, 2009, 24(1): 99-103.
ZHANG Anxue, FAN Shiyi, JIANG Yansheng, et al. Wilkinson power divider based on composite right/left-handed transmission-line[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009, 24(1): 99-103. (in Chinese)
- [5] NICOLSON A M, ROSS G F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time domain techniques[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 1968, 19(4): 377-382.
- [6] MENZEL C, PAUL T, ROCKSTUHL C, et al. Validity of effective material parameters for optical fishnet metamaterials[J]. Phys Rev B, 2010, 81: 035320-035328.
- [7] ZIOLKWSKI R W. Design, Fabrication, and testing of double negative metmaterials[J]. IEEE Trans Antenn Propag, 2003, 51(7): 1516-1529.
- [8] 杨晨, 张洪欣, 王海侠. 对称镜框型左手单元结构与仿真[J]. 电波科学学报, 2011, 26(增刊): 131-135.
- [9] 王海侠, 吕英华, 张洪欣, 等. 基于双Z形金属条的二维左手材料研究[J]. 物理学报, 2011, 60(3): 034101.
WANG Haixia, LV Yinghua, ZHANG Hongxin, et al. Study on double incidence left-handed material composed of double Z-shaped metal strips[J]. Acta Phys Sin, 2011, 60(3): 034101. (in Chinese)
- [10] 崔万照, 马伟, 邱乐德, 等. 电磁超介质及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 158-166.
- [11] 黄健全, 褚庆昕, 刘传运. 新型超宽带复合左右手传输线的设计与实现[J]. 电波科学学报, 2010, 25(3): 460-465.

HUANG Jianquan, CHU Qingxin, LIU Chuanyun. Design and realization of novel ultra wide band CRLH transmission line[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(3): 460-465. (in Chinese)

作者简介



张洪欣 (1969—), 男, 山东人, 北京邮电大学教授、博士生导师。国家自然科学基金项目同行评议专家, 中国电子学会 DSP 应用专家委员会委员, 北京市科学技术奖励评审专家, 北京电子电器协会电磁兼容分会委员, 中华医学预防会自由基委员会委员, 北京邮电大学育人标兵。从事无线通信与电磁兼容、生物电子等领域的研究工作, 发表论文 140 余篇。



许媛媛 (1988—), 女, 山东人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为人工电磁异向媒质。



杨晨 (1986—), 男, 河北人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为电磁超介质。

徐楠 (1987—), 女, 辽宁人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为电磁超介质在微波器件上的应用。

黄丽玉 (1988—), 女, 福建人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为电磁超介质设计及验证。