

紧凑型复合左右手传输线电磁特性

蔡通¹, 王光明¹, 蔡磊²

(1.空军工程大学防空反导学院,陕西西安,710051;2.廊坊燕京职业技术学院,河北廊坊,065200)

摘要 提出了基于正六边形互补开口单环谐振器对的紧凑型复合左右手传输结构及其等效电路模型。通过对结构参数的仿真分析,明确了该型传输线的作用机理,实现了对谐振频点和带宽的操控;设计的传输线在4 GHz处实现了左右手的无缝连接,其-10 dB阻抗带宽达到了1.85 GHz(3.61~5.46 GHz),相对带宽达到了40.8%;采用转移参数矩阵与Bloch-Floquet理论对电路模型进行了深入分析,电磁仿真模型、等效电路模型和测试结果的高度一致性证明了等效电路模型的合理性与有效性;并提取了等效电磁参数模型,验证了该结构的负折射率与后向波传输特性。

关键词 正六边形互补开口单环谐振器对;复合左右手传输线;等效电路模型;负折射率

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.03.011

中图分类号 TN81 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)03-0045-04

A Study of Electromagnetic Characteristics on Novel Compact Composite Right/Left-Handed Transmission Line

CAI Tong¹, WANG Guang-ming¹, CAI Lei²

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Langfang Yanjing Vocational and Technical College, Langfang 065200, Hebei, China)

Abstract: A novel resonant-type composite right/left-handed transmission line and its correlative lumped-element equivalent circuit model are presented based on regular hexagon complementary single split ring resonator pair. The effective mechanism of its transmission lines is further defined, the control of the resonance frequency and that of the transmission band are realized through analysis of the structure parameters. A perfect balanced condition at 4 GHz is accomplished for the novel CRLH TL, and its impedance bandwidth comes to 1.85 GHz (3.61~5.46 GHz), and the relative bandwidth comes to 40.8%. The circuit model is analyzed in depth by adopting transfer parameter matrix and Bloch-Floquet theory. A high coincidence of parameters' results of the circuit model and the electromagnetic simulation proves the correctness and efficiency of the circuit model. And a balanced condition is extracted. The negative refractive index and the backward wave propagation are demonstrated by the effective electromagnetic parameter retrieval.

Key words: regular hexagon complementary single split ring resonator pair; composite right/left-handed transmission line; balanced condition; negative refractive index

收稿日期:2013-05-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60971118;61372034)

作者简介:蔡通(1990-),男,山西运城人,博士生,主要从事天线、超材料等研究.E-mail:caitong326@sina.cn

引用格式:蔡通,王光明,蔡磊.紧凑型复合左右手传输线电磁特性[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(2):45-48. CAI Tong, WANG Guangming, CAI Lei. A study of electromagnetic characteristics on novel compact composite right/left-handed transmission line[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(2): 45-48.

1968年, Veselago 从理论上预言了电磁波可以在介电常数和磁导率同时为负的电磁媒质中传播^[1], 2000年, Smith 在 Pendry^[2]等人的研究基础上, 利用周期排列的金属细导线和开口环谐振器, 首次合成了双负材料^[3-4], 即左手材料。但传统块状左手材料结构复杂, 左手带宽窄, 损耗大, 为了解决这一难题, Eleftheriades^[5]和 Itoh^[6]教授领导的研究小组分别采用集总元件和分布参数实现了复合左右手传输线(Composite Right/Left-Handed Transmission Line, CRLH TL), 2004年, Falcon 创造性地利用逆开环谐振器结构设计了 CRLH TL^[7], 此后, 大量衍生结构被提出, 其中, 文献[8]提出的基于互补开环谐振器对的 CRLH TL 推导了平衡态公式, 实现了对传输频点的控制, 文献[9]提出的互补螺旋谐振传输线具有插入损耗小的特点, 但其带宽均相对较窄。

为了实现频点可控、相对带宽大、回波损耗低、易于制作的 CRLH TL 结构, 本文提出并研究了基于正六边形互补开口单环谐振器对(Regular Hexagon Complementary Single Split Ring Resonator Pair, RH-CSSRRP)的新型 CRLH TL。

1 结构与等效电路模型

利用简单易行的结构, 实现最大的并联分布电感和串联分布电容, 使左手通带与右手通带无缝连接, 是拓宽传输通带的有效方法^[8]。基于这一思想, 本文提出基于 RH-CSSRRP 的 CRLH TL 结构见图 1(a)。该结构具有对称性, 接地板上刻蚀了边长为 d 的正六边形谐振器对, 接地板刻蚀的耦合环宽度为 d_1 , 距顶点距离为 a 时宽度为 d_2 的双缝对称分布, 介电常数为 2.65, 厚度为 0.8 mm 的聚四氟乙烯玻璃布板中央, 50 Ω 的微带线对称分布, 中间宽为 d_3 的缝隙用于提供电场激励, 由于其结构的特殊性, 可以提供 2 种激励模式: 第 1 种模式由上层微带线与正六边形谐振器对的外围边界及双缝激发, 见图 1(b); 第 2 种模式由上层微带线与正六边形谐振环及单缝激发, 见图 1(c)。由于这 2 种激励模式的产生, 本文采用双并联支路模型对其进行等效^[10], 见图 2(a), C_g 为缝隙电容, L_s 为线电感, C_1 与 C_2 分别为不同激励模式下线电容以及微带线与正六边形谐振器对间耦合电容。 C_p 、 L_p 分别为不同激励模式下的电响应。

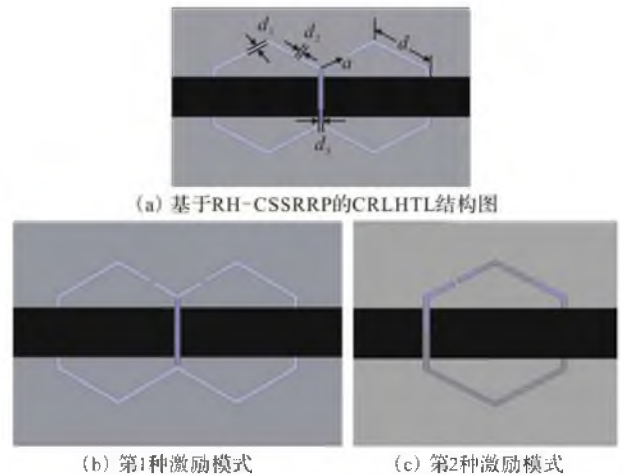


图 1 拓扑结构及激励模式

Fig.1 Structure and mode excitation

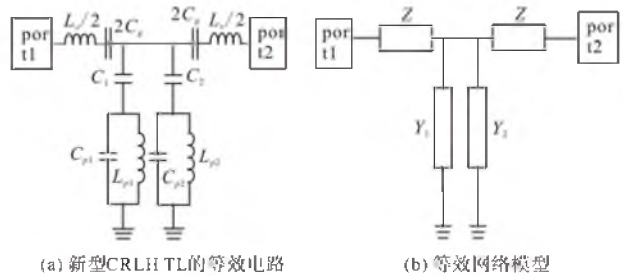


图 2 等效电路模型

Fig.2 Equivalent circuit model

将电路模型进一步等效为 4 个元件级联的二端口网络, 见图 2(b), 本文采用转移参数矩阵对其进行分析, 其转移参数矩阵为:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + Z(Y_1 + Y_2) & Z(2 + Z(Y_1 + Y_2)) \\ Y_1 + Y_2 & 1 + Z(Y_1 + Y_2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据 Bloch-Floquet 理论可知:

$$\gamma(\omega) = \text{arccosh}(A)/d \quad (2)$$

$$Z_\beta = B/\sqrt{A^2 - 1} \quad (3)$$

式中: $\gamma(\omega)$ 为传播常数; Z_β 为特性阻抗; d 为单元结构的有效长度。由 $\gamma(\omega) = \alpha + j\beta$ (α 为衰减常数, β 为传播常数) 电磁波的传播条件可知, $\alpha = 0$ 。将式 (1) 带入式 (2)~(3) 可得:

$$\beta d = \arccos(A) = \arccos(1 + Z(Y_1 + Y_2)) \quad (4)$$

$$Z_\beta = \sqrt{Z(2/(Y_1 + Y_2) + Z)} \quad (5)$$

当 $\beta d = 0$ 时, 获得右手通带的下限频率和左手通带的上限频率, 当 2 个频率相同时, 实现左右手的无缝连接; 当 $\beta d = \pi$ 时, 获得左手通带的下限频率和右手通带的上限频率, 增大 2 者之差, 可以达到拓宽频带的目的。当 $1/C = 0$ 时, 可以得出通带外的传输零点为:

$$f_{z1} = 1/2\pi \sqrt{L_{p1}(C_1 + C_{p1})} \quad (6)$$

$$f_{z2} = 1/2\pi \sqrt{L_{p2}(C_2 + C_{p2})} \quad (7)$$

2 电磁特性与电路参数提取

为了确定各个结构参数对该 CRLH 单元电磁特性影响,使用全波电磁仿真软件 HFSS 对该结构进行仿真。分别得到 d 、 a 及 d_1 的变化对 S 参数影响的曲线,其结果见图 3。

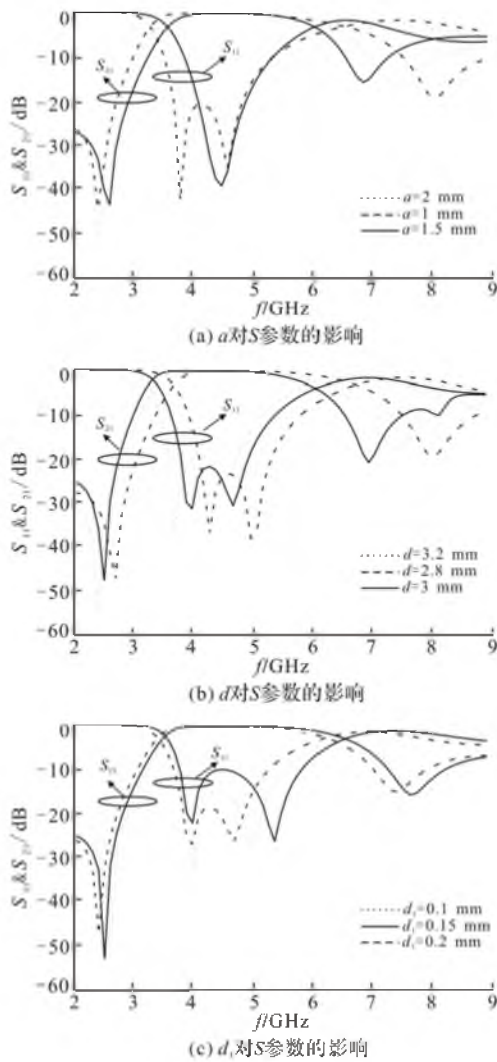


图3 不同结构变量对 S 参数的影响

Fig.3 Dependence of S parameters on different structure parameters

由图 3 知,当 a 变化时,高频谐振点基本保持不变, d_1 变化时,低频谐振点基本不变,因此,低频谐振点主要由 a 决定,而高频谐振点主要由 d_1 控制,通过调控 a 与 d_1 ,可以实现对该新型结构高低频点的操控,说明该结构具有很好的频点设计自由度。当 d 变化时,谐振频点几乎发生相同比例的变化,但在低频带外传输零点变化不大,而高频带外传输零点发生显著变化,因此,可用于调节通带宽度和高

频选择性。基于以上讨论,综合考虑传输线的回波损耗,传输系数,通带宽度,以及带外选择性等因素,优化得到新结构的物理尺寸为: $d = 3 \text{ mm}$, $d_1 = 0.2 \text{ mm}$, $d_2 = 0.2 \text{ mm}$, $d_3 = 0.3 \text{ mm}$, $a = 1.3 \text{ mm}$,并对其进行电磁仿真,结果见图 4(a),在传输通带上下频点 2.39 GHz 与 7.95 GHz 处,存在 2 个带外传输零点,增加了传输通带的频率选择性; -10 dB 阻抗带宽达到 1.85 GHz (3.61~5.46 GHz),相对带宽达到了 40.8%,这与传统 CRLH TL 的 0.2 GHz 相比,带宽明显增强,与文献[8]提出的 CCSSRR 结构相比,相对带宽增加了 23.1%;在 -10 dB 带宽范围内,传输系数均优于 0.4 dB,说明该频段内电磁波传输性能良好。

根据图 2(a)的等效电路模型,基于电路仿真软件 Serenade,采用幅相匹配的方法,将得到的 S 参数与电磁仿真结果进行对比优化,得到各集总元件值为: $C_g = 1.17 \text{ pF}$, $L_s = 1.36 \text{ nH}$, $C_1 = 13.28 \text{ pF}$, $C_{p1} = 1.07 \text{ pF}$, $L_{p1} = 1.01 \text{ nH}$, $C_2 = 0.54 \text{ pF}$, $C_{p2} = 9.50 \text{ pF}$, $L_{p2} = 0.04 \text{ nH}$ 。由图 4(a)可知,电磁仿真与电路仿真结果吻合良好,验证了等效电路的合理性与正确性。通过该 CRLH TL 进行加工,并使用 ME7808A 型宽带网络矢量分析仪对其进行测试,测试结果与仿真结果吻合较好。

将提取出的电路参数带入式(1)~式(3),得到传播常数 γ ,矩阵参数 C 的变化曲线,见图 4(b)。

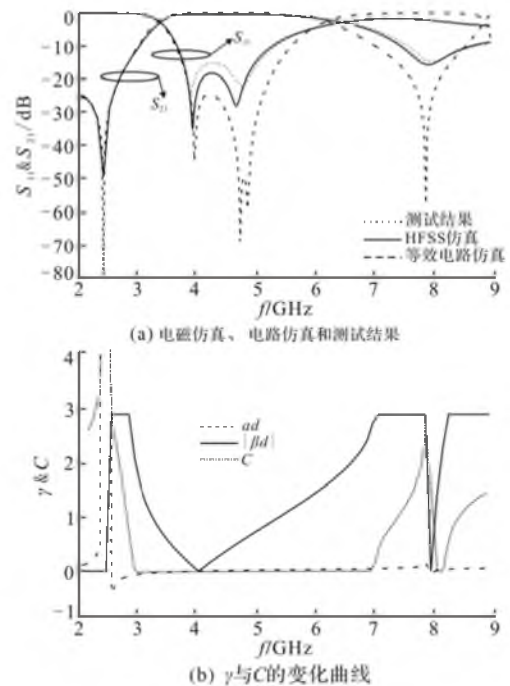


图4 新型 CRLH TL 的 S 参数及色散曲线

Fig.4 S parameters and dispersive curve for the novel CRLH TL

由色散曲线可知,在 4 GHz 处,相移常数为 0,不存在阻带,2.51~4 GHz 时,属于传输线的左手频段,

但在频段 2.5~2.89 GHz, 衰减常数为正值, 说明该频段内, 电磁波衰减很快, 无法传播, 因此, 2.89 GHz 为左手通带的下限频率; 4~7.91 GHz, 时属于该传输线的右手频段, 7.01~7.97 GHz 频段内, 电磁波无法传输, 7.01 GHz 为右手通带的上限频率; 左手通带上限频率和右手通带的下限频率均为 4 GHz, 从矩阵参数 C 曲线可以看出, 在 2.38 GHz 与 7.91 GHz 处, 2 个并联支路谐振, 对应 2 个带外抑制零点, 这与图 4(a) 中电磁仿真结果符合很好。

3 等效电磁参数提取

为了深入分析新型 CRLH TL 的电磁特性, 将自由空间的传输等效为填充微带线的传输, 通过 S 参数, 提取该结构的等效介电常数, 磁导率和折射率, 见图 5。

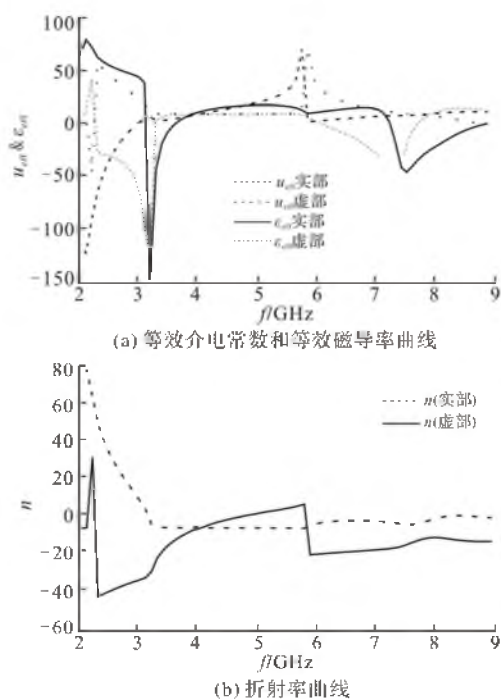


图 5 电磁参数曲线

Fig.5 EM parameters

由图 5(a) 可知, 在频段 3.05~4.02 GHz 时, 等效介电常数与等效磁导率实部均为负值, 且其虚部近似为 0, 表明在此频段内新型结构为左手传输线, 这与由相移常数确定的 2.89~4 GHz 频段吻合较好, 与图 5(b) 中折射率实部为负值, 实部接近 0 的频段完全一致; 在频段 4.02~5.85 GHz, 等效介电常数与等效磁导率实部均为正值, 且虚部均接近于 0, 表明该频段内电磁波传输满足右手效应, 与图 5(b) 中折射率为正值的频段区间 4.02~5.84 GHz 吻合很好; 在 5.84~7.1 GHz 频段, 磁导率实部接近于 0, 介电常数实部大于 0, 该部分也为右手部分。4.02 GHz 时, 新型结构由双负媒质向传统媒质过

渡, 即为左右手的过渡频点。在 2.36 GHz 与 7.55 GHz 处, 由于等效磁导率与等效介电常数虚部最大, 表明电磁波在这 2 处抑制作用最强, 因此可以形成传输零点, 图 4(a) 中的 2 个带外传输零点非常相近。图 5 结果有效验证了所提出的 CRLH TL 的负折射率与后向波传输特性。

4 结语

本文提出了基于正六边形谐振器对的新型 CRHL TL 结构, 通过分析各结构参数对电磁特性的影响, 实现了对不同谐振频率以及频带宽度的操控; 提出了双并联支路模型, 利用转移参数矩阵与 Bloch-Floquet 理论对电路模型进行了分析, 绘制了传播常数曲线, 验证了传输线的左手特性; 提取了模型的等效电磁参数, 其结果与电路参数保持了高度一致, 进一步验证了传输线的负折射率与后向波传输特性。

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, Kroll N. Negative refractive index in left-handed materials [J]. Physical review letters, 2000, 85:2933-2936.
- [4] Shelby R A. Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, lefthanded metamaterial [J]. Applied physics letters, 2001, 78(4):489-491.
- [5] Eleftheriades G V, Iyer A K. 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.
- [6] Caloz C, Itoh T. Positive/negative refractive index anisotropic 2-D metamaterials [J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2003, 13(12):547-549.
- [7] Falcone F, Lopetegi T, Laso M A G, et al. Effective negative stopband microstrip lines based on complementary split ring resonators [J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2004, 14(6):280-282.
- [8] Xu Hexiu, Wang Guangming. Characterisation of composite right/left-handed transmission line [J]. Electronics letters, 2011, 47(18):1030-1031.
- [9] Nardeen Tharwat Messiha, Atef M, Ghuniem Hadia M, et al. Planar transmission line medium with negative refractive index based on complementary omega-like structure [J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2008, 18(9): 575-577.

(编辑:田新华)