

文章编号: 1000-5862(2016)03-0299-04

# 具有谐振特性的双通带左手材料的设计

张芳, 黄乃岳, 金农, 骆兴芳\*

(江西师范大学物理与通信电子学院, 江西 南昌 330022)

摘要: 通过对谐振型左手材料的理论分析, 提出了一种新型双通带左手材料的单元结构. 该结构由 E 型和双谐振环构成的谐振器与金属线组合而成, 其中谐振器实现负磁导率, 金属线实现负介电常数. 利用电磁仿真软件, 分析该材料单元结构的谐振特性, 提取该结构的折射率、波阻抗以及介电常数、磁导率. 仿真结果表明: 该结构在其工作频段内存在 2 个通带, 并且在这 2 个通带内该结构都具有左手特性.

关键词: 左手材料; 谐振型; 双通带; 负折射

中图分类号: TN 454 文献标志码: A DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2016.03.17

## 0 引言

V. G. Veselago 于 1968 年提出左手材料(Left-Handed Material, LHM)的概念, 指出“左手材料”就是介电常数  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$  都同时为负值的人工周期性材料, 也称为“双负介质(材料)”<sup>[1]</sup>, 但由于当时自然界中不存在磁导率和介电常数这两者都同时为负值的材料, 导致左手材料一直无人理睬. 直到 2000 年, 在 J. B. Pendry 等<sup>[2-3]</sup>提出的设计思想基础上, D. R. Smith 等<sup>[4]</sup>研究小组用开口谐振环和金属棒首次实现了左手材料. 之后, 左手材料的研究呈现爆炸式的发展态势.

具有负值的介电常数通常是由金属线来实现, 具有负值的磁导率通常是由谐振器来实现, 当负的介电常数与负的磁导率在同一频段时, 就能实现折射率为负值, 形成具有谐振特性的左手材料. 随着左手材料的发展, 越来越多的左手材料设计形式被提出, 如 C. R. Simovsk 等<sup>[5]</sup>提出的  $\Omega$  型结构, 陈红胜等<sup>[6-7]</sup>提出的 S 型结构, T. M. Grzegorzcyk 等<sup>[8]</sup>提出的对称环结构以及白冬萍等<sup>[9]</sup>提出的 E 型结构等. 但是这些设计形式大多只有一个频段, 关于多通带左手材料的研究较少<sup>[10-14]</sup>, 使得左手材料在工程应用中有一定的局限性, 并且双通带的左手材料会减少左手材料的体积, 增强其可靠性. 因此具有负折射特性的左手材料在多个频段内的应用也是研究者关注的问题之一.

笔者设计了一种具有谐振特性的新型左手材料单元结构. 在电磁场激励下, 单元结构可以通过金属线与谐振器产生电谐振与磁谐振, 实现谐振型左手特性. 数值仿真结果显示, 该结构在 18.6 ~ 23.1 GHz 和 24.8 ~ 31 GHz 的 2 个频段内有效介电常数和有效磁导率均为负值, 同时在该 2 个频段范围内具有负折射特性, 从而证明了该结构在这 2 个频段内的左手特性.

## 1 左手材料的结构设计与分析

电磁波传输系统可以等效为传输线网络, 实现左手材料的负折射特性, 需要在同一频段内同时产生负的介电常数  $\epsilon$  和负的磁导率  $\mu$ . 尽管传输线理论上存在纯左手材料传输线等效电路模型. 由于电磁波传播时会存在寄生效应, 这种纯左手传输线等效电路模型在自然界中是不存在的, 在一定频段内会伴随着右手材料的特性. 因此在设计中使用在普通传输线中加载并联电感与串联电容来实现左手传输线. 图 1 为理想左右手复合型传输线模型.  $C_R$  与  $C_L$  分别为并联分布电容和串联分布电容,  $L_L$  和  $L_R$  分别为并联分布电感和串联分布电感. 其中  $C_L$  和  $L_L$  会表现出左手传输线的分布参量.

根据法拉第电磁感应定律, 当电磁波平行入射时, 入射电磁波磁场会在磁谐振器上产生感应电流, 形成 LC 谐振回路. 本文所提出结构的谐振器主要是由 E 型和双谐振环构成, 在磁谐振频段会实现等效磁

收稿日期: 2016-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(51461019)资助项目.

通信作者: 骆兴芳(1976-), 女, 新疆昌吉人, 教授, 博士, 主要从事电磁场与微波器件的研究.

导率小于0.由Pendry的理论可知,在外加电场的作  
用下,由金属线阵列在电谐振频段可实现等效介电常  
数小于0<sup>[2]</sup>.当电谐振和磁谐振的谐振频段重合时,  
该材料就能够体现出双负特性,即左手特性.

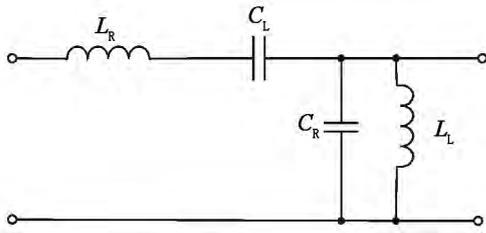


图1 理想复合左右手传输线等效电路

图2为所提结构模型单元3维结构示意图,图  
3为结构单元尺寸标注.单元规格为3 mm × 3 mm ×  
2.5 mm,介质基板材料选用FR-4(介电常数 $\epsilon = 4.4$ ,损  
耗角正切为0.02),其厚度为0.5 mm,表面覆盖铜厚  
度为0.03 mm.其中 $w = 2$  mm  $b = 0.2$  mm  $a = 0.2$  mm,  
 $s = 0.3$  mm  $l = 3$  mm  $c = 0.1$  mm  $e = 0.1$  mm  $h = 2$  mm,  
 $g = 0.7$  mm.把与 $z$ 轴垂直的2个边界设置为理想电  
边界(PERFECT ELECTRIC CONDUCTOR, PEC),把与 $y$ 轴垂  
直的2个边界设置为理想磁边界(PERFECT MAGNETIC  
CONDUCTOR, PMC),电磁波从模型的左端平行入射.

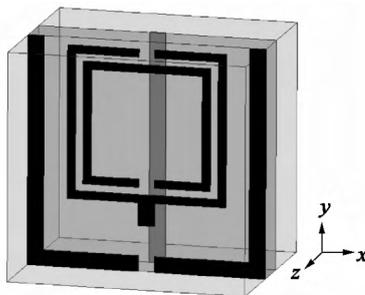


图2 3维单元结构模型

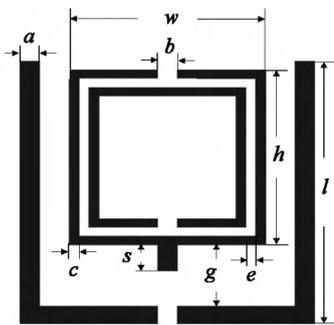


图3 单元结构模型的尺寸

## 2 单元结构仿真结果及分析

通过3维电磁仿真软件对图2与图3所示的结  
构进行模拟仿真得到其 $S$ 参数,如图4所示.

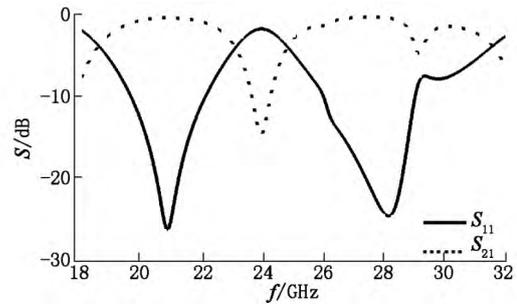


图4  $S$ 参数幅度值随频率的变化曲线

由图4可知在18.6 ~ 23.1 GHz和24.8 ~ 31.6 GHz  
的2个频段内出现明显的通带,同时在这2个频率  
范围内 $S_{11}$ 的值大于-24 dB, $S_{21}$ 的值小于-5 dB,  
但是仅从图4并不能看出结构的左手特性,因此需  
要知道折射率在这2个频段内是否为负值,具体计  
算公式<sup>[15]</sup>为

$$n = \frac{1}{kh} \cos^{-1} \left( \frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right), \quad (1)$$

$$z = \sqrt{\left( (1 + S_{11})^2 - S_{21}^2 \right) / \left( (1 - S_{11})^2 - S_{21}^2 \right)}, \quad (2)$$

其中 $n$ 为折射系数, $Z$ 为结构的阻抗, $k$ 为波数, $h$ 为  
左手材料的平板厚度.由(1) ~ (2)式可以得折射  
率与波阻抗随频率变化曲线,如图5与图6所示.从  
图5可以看出该结构在18 ~ 32 GHz折射率的实部  
为负值,在18.6 ~ 23.1 GHz和24.8 ~ 31.0 GHz这  
2个频率范围内折射率的虚部接近于0.

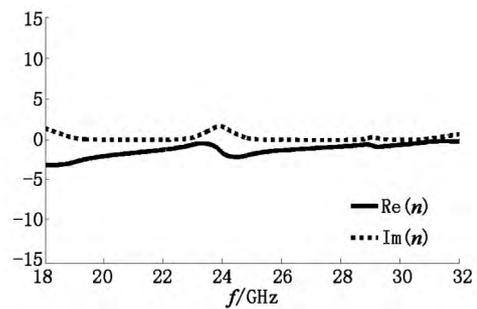


图5 折射率随频率变化曲线

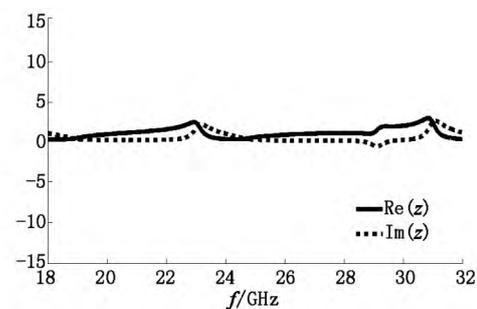


图6 波阻抗随频率变化曲线

从图6可以看出该结构在18 ~ 32 GHz波阻抗  
的实部大于零,18.6 ~ 23.1 GHz和24.8 ~ 31.0  
GHz这2个频率范围内虚部接近于0, $n$ 和 $Z$ 与 $\epsilon$ 和

$\mu$  的关系为

$$\epsilon = n/z, \tag{3}$$

$$\mu = nz, \tag{4}$$

由(3)~(4)式可以得出介电常数与磁导率随频率变化曲线,如图7与图8所示。

从图7可以看出在18.5~23.1 GHz和24.5~31.0 GHz具有负的等效介电常数,从图8中可以看出该结构在18~32 GHz具有负的等效磁导率。综上所述,该结构在18.6~23.1 GHz和24.8~31.0 GHz为双频段,其中心频率分别是20.8 GHz和28.2 GHz。

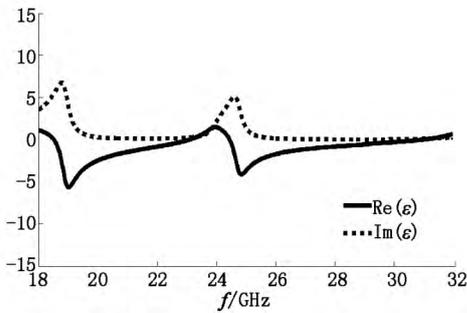


图7 介电常数随频率变化曲线

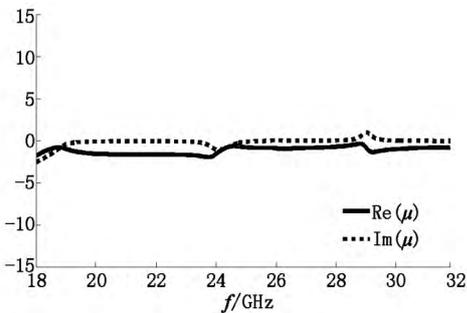


图8 磁导率随频率变化曲线

当电磁波入射时,该结构在谐振点20.8 GHz处的表面电流及电场强度分布如图9和图10所示,从图9可以看出双开口谐振环内外环产生相反方向的强电流,可等效为电感。从图10可以看出,由于谐振环开口区存在的强电场可形成一个电容。两者结合形成具有谐振特性的左手材料。

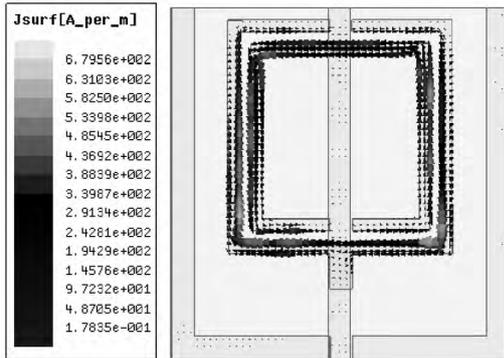


图9 20.8 GHz处单元结构表面电流分布图

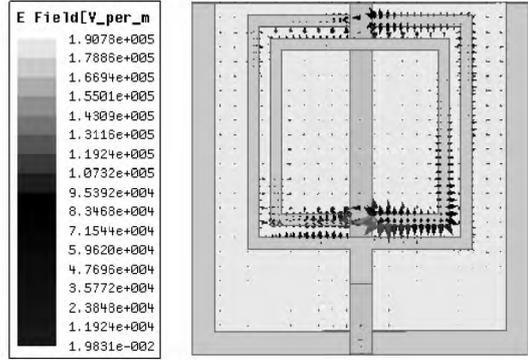


图10 20.8 GHz处单元结构电场分布图

当电磁波入射时,该结构在谐振点28.2 GHz处的表面电流分布图以及电场强度分布图如图11和图12所示,从图11可以看出双开口谐振环外环与E型外环上产生不同方向强电流。从图12可以看出,由于E型下方开口区存在的强电场可形成一个电容,两者结合在28.2 GHz处产生电磁谐振。

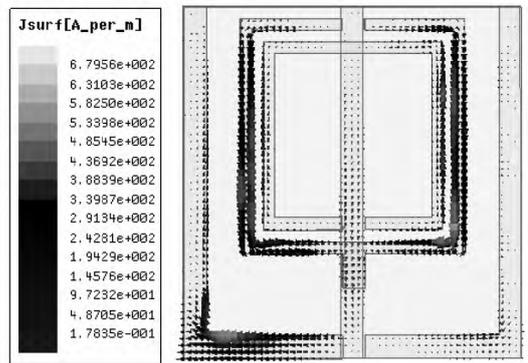


图11 28.2 GHz处单元结构表面电流分布图

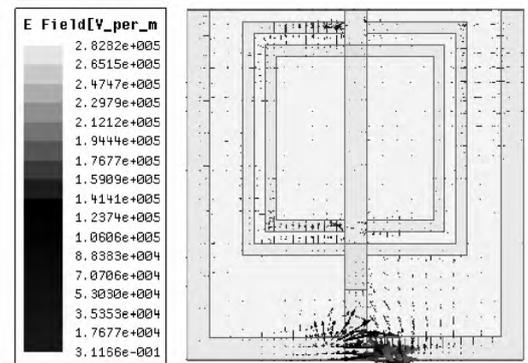
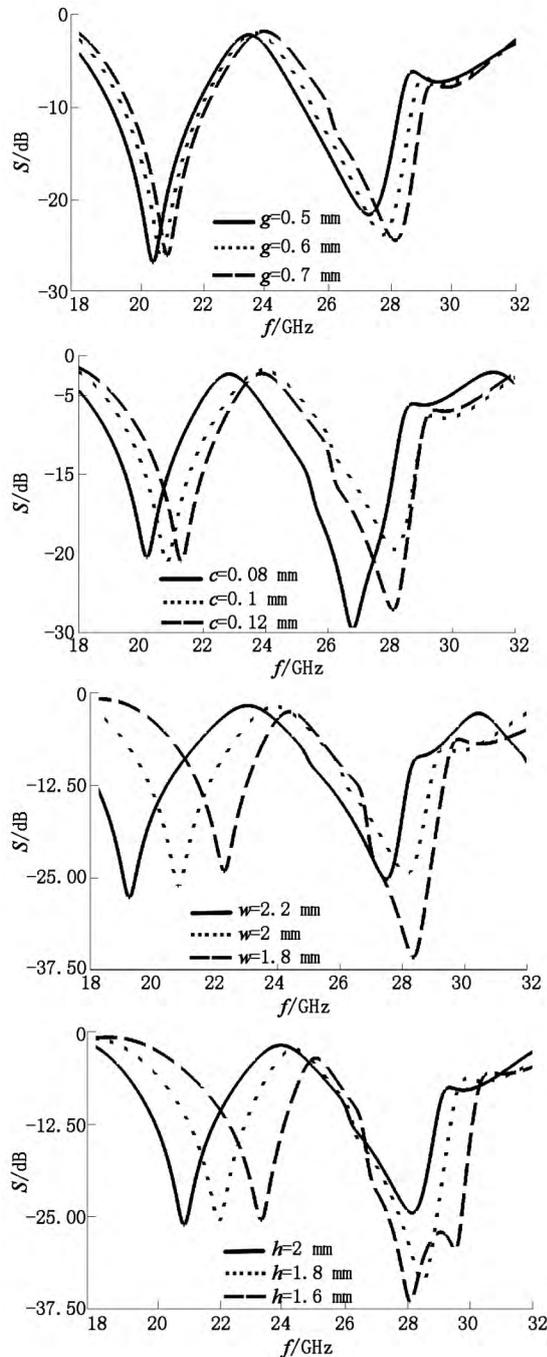


图12 28.2 GHz处单元结构电场分布图

### 3 结构参数对其谐振特性的影响

图13为单元结构参数对其谐振特性的影响,从图13(a)可以看出在其它参数保持不变的情况下,谐振频率随SRR环到E型的间距g长度的增加而增大。从图13(b)可以看出随着SRR环内外环的宽度

$c$  的增加,第1个谐振点增大,但第2个谐振点并不随着  $c$  的增加而增大.从图13(c)与13(d)可以看出当其它参数不变的情况下,单独改变  $w$  或  $h$  会使得第1个谐振点增加或减小,但并不会使第2个谐振点有较大改变.因此,要想实现所需要的谐振点,可以通过改变该结构中某一参数的尺寸,产生不同的等效电容与等效电感,呈现不同的负磁导率.实现所需要的双通带左手材料.



(a)  $g$  不同时的反射参数 (b)  $c$  不同时的反射参数,  
(c)  $w$  不同时的反射参数 (d)  $h$  不同时的反射参数.

图13 单元结构参数对其反射参数的影响

## 4 结论

基于左手材料设计的理论,针对当前多通带左手材料的研究热点,提出了一种新型双通带左手材料的结构单元.利用仿真软件对其结构进行模拟仿真.数值仿真结果表明,该结构在 18.6 ~ 23.1 GHz 和 24.8 ~ 31.0 GHz 频率范围内存在由谐振特性产生的左手频段.计算验证了该结构单元在这2个频段内具有双负特性,并且其相对带宽分别达到了 21.6% 和 22.2%.本研究结果可为多通带通信提供数据参考.

## 5 参考文献

- [1] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\mu$  and  $\varepsilon$  [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509-514.
- [2] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. Physical Review Letters, 1996, 76(25): 4773-4776.
- [3] 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, 2000, 47(11): 2075-2084.
- [4] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. Physical Review Letters, 1999, 84(18): 4184-4187.
- [5] Simovski C R, He Sailing. Frequency range and explicit expressions for negative permittivity and permeability for an isotropic medium formed by a lattice of perfectly conducting  $\Omega$  particles [J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(3): 254-263.
- [6] Chen Hongsheng, Ran Lixin, Huangfu Jiangtao, et al. Metamaterial exhibiting left-handed properties over multiple frequency hands [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(9): 5338-5340.
- [7] Chen Hongsheng, Ran Lixin, Huangfu Jiangtao. Magnetic properties of S-shaped split ring resonator [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2005, 51(7): 231-247.
- [8] Grzegorzczak T M, Moss C D, Lu Jie, et al. Properties of left-handed metamaterials: Transmission, backward phase, negative refraction and focusing [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(9): 2956-2967.
- [9] 白冬萍,张洁婷,邓晖. E型左手材料 [J]. 微波学报, 2012, 28(2): 71-74

(下转第323页)

## The Space-Time Evolution of Economic and Environmental Collaborative Analysis of the Poyang Lake Ecological Economic Zone

LIU Manfeng<sup>1</sup>, XU Juanjuan<sup>2</sup>

(1. The Collaborative Innovation Center, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang Jiangxi 330013, China;

2. The School of Information Management, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang Jiangxi 330013, China)

**Abstract:** The order parameters evaluation index system of coordinated development of economy and environment of Poyang Lake Ecological Economic Zone are built. A collaborative evolution measurement model assessment of economic systems and environmental systems for the collaborative development of the symbiosis mode is set up, and the evaluation of economic and environmental issues for the dynamic coupling are studied from 2009 to 2012. Research results display that the Poyang Lake Ecological Economic Zone show a better development momentum at the first two years, but it fell from 2011, the integrated collaborative level render out uneven distribution in space, most area is the economic lagging type, minority area is environment lagging type, for the area of economic lag behind environment, it should undertake industry transfer and optimize resources configuration, and for the area of environment lag behind economic, the economic development should be controlled within the threshold of the environment, and the area should timely regulating resources supply and demand strategy.

**Key words:** Poyang Lake Ecological Economic Zone; economy; environment; collaborative evolution; dynamic coupling  
(责任编辑:曾剑锋)

(上接第302页)

- [10] 李文强,曹祥玉,高军,等.基于斜三角开口对环的宽带低耗左手材料[J].物理学报,2012,61(15):154102.
- [11] Sabah C. Member multiband metamaterials based on multiple concentric open-ring resonators topology [J]. Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(1): 8500808.
- [12] Xu Hexiu, Wang Guangming, Liu Qiang, et al. A metamaterial with multi-band left handed characteristic [J]. Applied Physics A, 2012, 107(2): 261-268.
- [13] 刘海文,雷久淮,赵玉龙,等.基于双模开环谐振器的双通带带通滤波器设计[J].江西师范大学学报:自然科学版,2013,37(5):488-491.
- [14] 刘海文,蒋浩,雷久淮,等.基于开环谐振器和非对称耦合线的三通带带通滤波器设计[J].江西师范大学学报:自然科学版,2014,38(4):370-373.
- [15] Smith D R, Vier D C, Koschny T. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials [J]. Physical Review E, 2005, 71(3): 6617-6628.

## The Design of Dual Band Left-Handed Metamaterial with Resonance Characteristic

ZHANG Fang, HUANG Naiyue, JIN Nong, LUO Xingfang\*

(School of Physics Communication and Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi 330022, China)

**Abstract:** A novel dual-band left-handed materials (LHM) structure is proposed which is composed of a copper wire and a resonator with double SRRs and a E ring. Resonators are used to achieve negative permeability and wires are used to achieve negative permittivity in the structure. The resonant characteristics of the structure are simulated. The refraction index, the wave impedance, the permittivity and the permeability are evaluated. The simulated results show that the proposed structure exhibits double pass-band left-handed characteristics.

**Key words:** left-handed materials; resonator; dual band; negative refraction

(责任编辑:冉小晓)