

# 一种用于毫米波通信的左手材料结构

朱亚鹏, 刘桥, 张正平\*

贵州大学大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025

**摘要** 基于等效电路模型理论,在介质基板单侧放置了两个交错多开口的矩形金属环,形成了一个新的材料结构,通过理论分析和模拟仿真,提取了有效的电磁参数。结果表明,该结构在 40.8~61.8 GHz 频段范围内的等效介电常数和等效磁导率均为负,绝对带宽达到 21 GHz,实现了宽频带特性。该研究结果为左手材料在毫米波通信中的应用提供了重要参考。

**关键词** 材料;左手材料;等效电路;开口矩形金属环;宽频带;毫米波通信

中图分类号 O441.4 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.051601

## A Kind of Left-Handed Material Structure Applied in Millimeter Wave Communication

Zhu Yapeng, Liu Qiao, Zhang Zhengping

College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China

**Abstract** Based on the equivalent circuit model theory, a rectangular metal ring with two interlaced multi-openings is placed on one side of the dielectric substrate, and thus a new kind of material structure is formed. Its effective electromagnetic parameters are extracted via the theoretical analysis and simulation. The results show that, the effective permittivity and effective permeability of this structure are both negative in the spectral range of 40.8-61.8 GHz, the absolute bandwidth is up to 21 GHz, and the wideband characteristic is achieved. These results provide an important reference for the application of left-handed materials in millimeter wave communication.

**Key words** material; left-handed material; equivalent circuit; opening rectangular metal rings; wide band; millimeter wave communication

**OCIS codes** 160.1245; 350.3618; 160.3918

## 1 引言

左手材料(LHM)是等效介电常数与等效磁导率同时为负的一种人工周期材料<sup>[1]</sup>。自 Veselago 等<sup>[1]</sup>首次提出左手材料这一概念后, Pendry 等<sup>[2]</sup>利用由细金属棒周期排列和金属谐振环(SRR)组成的人造媒质实现了左手特性。由于左手材料具有许多特殊的物理现象,其在微波应用方面备受关注。

随着研究的不断深入,众多新型的左手结构被

相继提出,如双十字架形<sup>[3]</sup>、多开口田字型<sup>[4]</sup>、十字交叉耦合型<sup>[5]</sup>等。近年来,左手材料的工作频段已经从厘米波频段扩展到毫米波、太赫兹波以及光波频段。2013年,周辅坤等<sup>[6]</sup>通过合理改变S型单元结构的尺寸,实现了在58.1~61.4 GHz频段范围内的具有双负特性的左手结构。2014年,易强等<sup>[7]</sup>在介质基板两侧反向刻蚀两环不对称的S型结构,实现了在48.2~52.2 GHz和58.7~60.8 GHz双频带范围内具有左手特性的左手结构。

收稿日期: 2017-10-18; 收到修改稿日期: 2017-11-30

基金项目: 国家科技部国际科技合作项目(2014DFA00670)

作者简介: 朱亚鹏(1993—),男,硕士研究生,主要从事电磁场与微波技术方面的研究。

E-mail: zhuyapeng0450@163.com

导师简介: 刘桥(1955—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事电路与系统、微电子技术方面的研究。

E-mail: liuqiao1955@163.com

\* 通信联系人。E-mail: zpzhang@gzu.edu.cn

为了进一步提高左手材料在毫米波频段的工作带宽,本文依据等效电路模型理论,在介质基板单侧集成了两个交错多开口的矩形谐振环,通过选择合理的单元结构参数,对结构尺寸进行了优化。结果表明,该结构在 40.8~61.8 GHz 频带范围内具有左手特性,绝对带宽可达 21 GHz,相对带宽达到 41%。

## 2 理论分析与结构设计

根据法拉第电磁感应定律,在一定频率电磁波平行入射下,谐振型左手结构被激发,产生了电谐振和磁谐振,在结构单元内部激发形成了电磁等离子体<sup>[8]</sup>,从而实现了等效介电常数和等效磁导率均为负的左手特性。当电谐振频率  $\omega_e$  和磁谐振频率  $\omega_m$  相等时,能最大限度地增大左手带宽<sup>[9-10]</sup>。

基于这一理论,将金属线集成在厚度为 0.254 mm,介电常数为 3.48 的介质基板单侧,金属线宽为 0.1 mm,厚度为 0.035 mm。该结构由两个交错多开口矩形谐振金属环构成,开口间距均为 0.1 mm,其他结构参数为: $a=1.5$  mm, $b=1.5$  mm, $c=0.9$  mm,如图 1(a)所示。

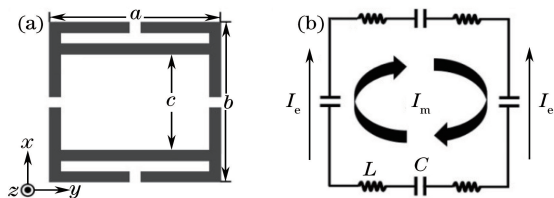


图 1 (a)单元结构;(b)外环等效电路

Fig. 1 (a) Unit model; (b) equivalent circuit of outer loop

文献[11]表明,多开口结构破坏了环间耦合电容,因此所设计结构中两个金属环形成了相对独立的两个谐振网络。图 1(b)所示为单元结构外环等效电路,其中  $L$  为金属条上的电感, $C$  为两个相邻金属线间的电容。当穿过平面的磁通量发生变化

时,感应电流  $I_m$  产生,在电场的作用下,会产生电流  $I_e$ 。

由图 1 可知,外环电谐振等效电路的总电感  $L_e=L$ ,总电容  $C_e=C$ 。外环磁谐振电路的总电感  $L_m=4L$ ,总电容  $C_m=C/4$ 。依据等效电路理论,外环等效电路的电谐振频率  $\omega_e=1/\sqrt{LC}$ ,磁谐振频率  $\omega_m=1/\sqrt{4L \times C/4}=1/\sqrt{LC}$ ,由此可得,外环等效电路具有相同的电磁谐振频率。虽然单元结构具有内外环,但实际上是一个整体,故这里仅仅对外环的电路模型进行分析是可行的。

## 3 模型仿真与结果分析

为了验证该结构具有左手特性,采用 HFSS 软件将单元结构放置在矩形波导中仿真,将垂直于  $x$  轴的两个波导壁设置为理想电壁(PEC),与  $z$  轴垂直的两个波导壁设置为理想磁壁(PMC),电磁波沿  $+y$  轴向  $-y$  轴方向传播。仿真结果如图 2 所示,其中  $S$  为散射参数, $S_{11}$  为回波损耗, $S_{21}$  为插入损耗。

由图 2 可知, $S_{11}$  的谐振点位于 41.7 GHz, $S_{11}$  为  $-49.9$  dB。 $S_{21}$  的相位值在 41.2 GHz 频率点发生突变,这预示着左手特性的出现<sup>[11]</sup>。为了准确有效地验证所设计结构是否具有左手特性,利用  $S$  参数计算出介质的折射率和阻抗,进而获取其等效介电常数和等效磁导率,其具体关系表达式<sup>[12]</sup>为

$$S_{11} = \frac{R_{01} [1 - \exp(j2nk_0 d)]}{1 - R_{01}^2 \exp(j2nk_0 d)}, \quad (1)$$

$$S_{21} = \frac{(1 - R_{01}) \exp(j2nk_0 d)}{1 - R_{01}^2 \exp(j2nk_0 d)}, \quad (2)$$

$$R_{01} = (z - 1)/(z + 1), \quad (3)$$

式中  $R_{01}$  为反射系数, $d$  为电磁波入射方向的材料厚度, $k_0$  为入射波矢量大小, $n$  为折射率, $z$  为归一化阻抗。

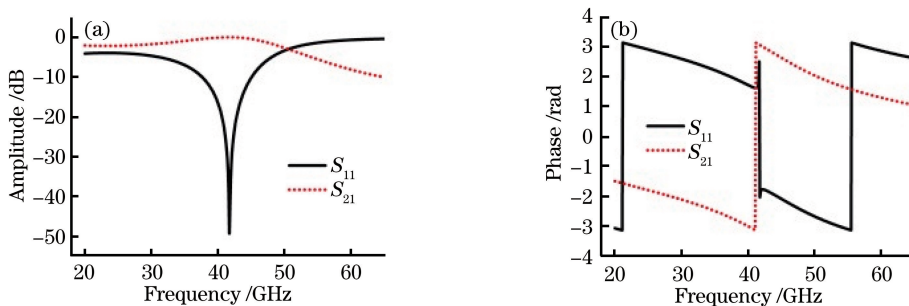


图 2 单元结构 S 参数。(a)幅度;(b)相位

Fig. 2 S parameter of unit structure. (a) Amplitude ; (b) phase

由(1)、(2)式得

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (4)$$

$$\exp(j2nk_0d) = X \pm j\sqrt{1 - X^2}, \quad (5)$$

式中

$$X = \frac{1}{2S_{21}}(1 - S_{11}^2 + S_{21}^2). \quad (6)$$

为了提取左手材料本构参数, (4)、(5)式的±符号由下式决定:

$$z' \geq 0, \quad (7)$$

$$n'' \geq 0, \quad (8)$$

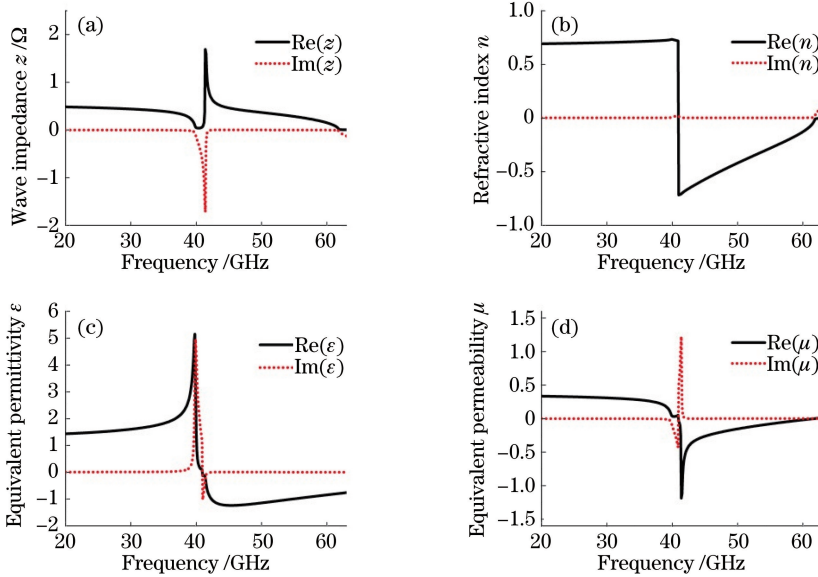


图3 (a)波阻抗曲线; (b)折射率曲线; (c)等效介电常数曲线; (d)等效磁导率曲线

Fig. 3 (a) Wave impedance; (b) index of refraction; (c) effective permittivity; (d) effective permeability

由图3可知,所设计的左手结构在40.8~61.8 GHz频带范围内,等效磁导率、等效介电常数和折射率均为负,通带内波阻抗始终为正,具有良好的左手特性,且带宽较宽。采用品质因数(FOM)<sup>[13]</sup>衡量结构的损耗特性,FOM越大损耗就越小,定义为

$$F_{\text{FOM}} = |\text{Re}(n)/\text{Im}(n)|. \quad (12)$$

由(12)式可知,折射率虚部的值越接近0,结构的损耗就越小。在左手特性频带内,FOM的峰值达到了451,频带外接近于0。由此可知,该结构在左手特性频带内具有低损耗特性,如图4所示。

## 4 结 论

基于谐振型设计原理,在介质基板单侧集成了交错多开口的矩形金属环。基于等效电路模型理论,采用波导法仿真提取了有效电磁参数,计算了单

式中“(·)′”和“(·)″”分别表示实部和虚部。折射率为

$$n = \frac{1}{k_0d} \{ \ln [\exp(j2k_0d)] \}'' + 2m\pi - j \{ \ln [\exp(j2k_0d)] \}' \}, \quad (9)$$

式中根据折射率实部分量支路选取的相关整数 $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。左手材料的等效介电常数和等效磁导率分别为

$$\epsilon_{\text{eff}} = n/z, \quad (10)$$

$$\mu_{\text{eff}} = nz. \quad (11)$$

由(10)、(11)式,求得单元结构相关参数,如图3所示。

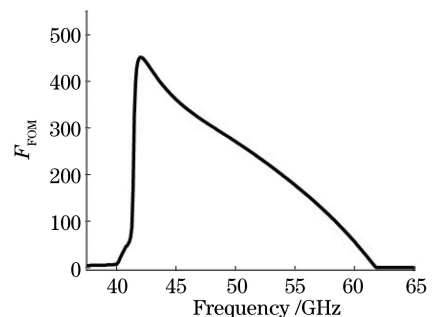


图4 左手区域的损耗曲线

Fig. 4 Loss at left-handed area

元结构的本构参数。结果表明,该左手结构在40.8~61.8 GHz范围内(毫米波频段)具有左手特性,绝对带宽可达21 GHz(大于其他设计<sup>[14]</sup>),实现了宽频带特性,并且具有小尺寸、低损耗的优点。该研究为宽频带左手材料的设计以及左手材料在毫米

波通信中的应用提供了一定的参考。

### 参 考 文 献

- [1] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative value of  $\epsilon$  and  $\mu$ [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] Dong H J, Geng Y L. Double cross-shape broadband low-loss and small units left-handed metamaterials based design and experimental verification[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(2): 024102.  
董怀景, 耿友林. 基于双十字架型宽带低耗小单元左手材料的设计与实验验证[J]. 物理学报, 2015, 64(2): 024102.
- [4] Wu L W, Zhang Z P. Broadband and low-loss left-handed materials based on multi-opening cross shape structures[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(16): 164101.  
吴良威, 张正平. 基于多开口田字形宽频带低损耗左手材料[J]. 物理学报, 2016, 65(16): 164101.
- [5] Li S L, Zeng W B, Chen Y H. Design of ultra wide band planar antenna based on left handed material [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, 39(4): 638-642.  
李顺利, 曾文波, 陈应辉. 基于左手材料的超宽带平面天线的设计[J]. 压电与声光, 2017, 39(4): 638-642.
- [6] Zhou F K, Yi Q, Luo X F. A kind of S-type structure of left-handed materials for 60 GHz communication[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(4): 423-426.  
周辅坤, 易强, 骆兴芳. 一种用于60GHz通信的S型结构左手材料的设计[J]. 光子学报, 2013, 42(4): 423-426.
- [7] Yi Q, Zhou F K, Zhang M, *et al.* Dual-band S-shaped left-handed material for millimeter wave communication application[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0416003.  
易强, 周辅坤, 张蒙, 等. 用于毫米波通信的双频带S型左手材料[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0416003.
- [8] Song Y C, Ding J, Guo C J, *et al.* Design and analysis of a broadband metamaterial[J]. Journal of Microwaves, 2015, 31(2): 28-32.  
宋一川, 丁君, 郭陈江, 等. 具有宽带特性的超材料设计与分析[J]. 微波学报, 2015, 31(2): 28-32.
- [9] Wang J F, Qu S B, Xu Z, *et al.* A method of analyzing transmission losses in left-handed metamaterials [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(8): 5015-5019.  
王甲富, 屈绍波, 徐卓, 等. 磁谐振和电谐振结构构成的左手材料设计[J]. 物理学报, 2008, 57(8): 5015-5019.
- [10] Gu C, Zhang X. A novel structure of left-handed material with equal magnetic and electric resonant frequency[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(6): 2800504.
- [11] Yang H, Wang C H, Guo X R. A novel dual-band left-handed metamaterials composed of multi-defects hexagonal structure[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(1): 014103.  
杨怀, 王春华, 郭小蓉. 基于正六边形多开口的新型双频带左手材料[J]. 物理学报, 2014, 63(1): 014103.
- [12] Nicolson A M, Ross G F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1970, 19(4): 377-382.
- [13] Jin D L. Research on left-handed metamaterials and the applications of metamaterials in antenna[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013: 22-24.  
金大琳. 左手材料及其在天线的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013: 22-24.
- [14] Shen C C, Li M Q, Zhou Y G, *et al.* Novel structure design of left-handed material with broadband and low loss[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 091602.  
沈纯纯, 李民权, 周永光, 等. 一种新型的宽频带低损耗左手材料结构设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 091602.