

基本结构变化对左手介质透射影响的研究

王茂琰¹, 徐军¹, 吴健², 吴军²

(1. 电子科技大学物理电子学院 成都 610054; 2. 电波环境特性及模化技术国家重点实验室 北京 昌平区 102206)

【摘要】研究了基本结构移动、旋转、切割对左手介质传输特性的影响。用基于时域有限积分法CST软件仿真了左手介质棱镜的负折射现象和上述三种情况下的传输系数, 比较了提取的标准和移动后左手介质的有效介质参数。计算结果表明, 移动使左手透射峰峰值降低, 通带带宽减小; 若将组成左手介质的结构单元旋转, 完整的左手透射峰将不再存在; 不同方向的切割会不同程度地改变左手介质透射峰的性质。

关键词 非整齐; 左手介质; 左手透射峰; 负折射
中图分类号 TN011 **文献标识码** A

Study of Effects of Disorder on Transmission of Left-Handed Materials

WANG Mao-yan¹, XU Jun¹, WU Jian², and WU Jun²

(1. School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;
2. National Key Laboratory of Electromagnetic Environment Changping Beijing 102206)

Abstract The effects caused by disorder, rotating and cutting in left-handed materials (LHM) are investigated. The negative refraction effect and the transmission coefficients of various shapes of LHM are simulated by CST software based on finite integration technique. The Extracted real parts of the permittivity, permeability, and index of refraction for the standard LHM are compared with those of disordered LHM. It is found that the disorder on the split ring resonators results in a lower left-handed transmission and narrower pass bands. The left-handed transmission peak disappears when the cells of LHM are rotated. The cuts of LHM in different directions destroy the properties of LHM in different degrees.

Key words disorder; left-handed materials; left-handed transmission peak; negative

文献[1]指出, 介电系数 ϵ 和磁导系数 μ 均为负的介质具有不同寻常的电磁特性, 如逆斯涅耳定律等, 该类介质称为“左手介质”。文献[2]根据文献[3]的理论, 用细金属导线阵列和开路环谐振器(split ring resonator, SRR)阵列构造了介电系数与磁导系数同时为负的人工介质, 这一发现引起人们极大的关注。文献[4]提出了另一种由传输线上加载串联的电容和并联的电感构成的左手介质。

近年来, 一些学者相继从实验和理论角度对左手介质的各种电磁特性进行研究^[5-9]: 文献[7]研究了由于SRR排列不整齐, 对其磁谐振带隙的影响; 文献[8]用传输矩阵法研究了各种尺寸SRR和电磁波在不同入射方向时左手介质的传输特性。

随着对左手材料制备的研究, 其潜在应用逐步显现, 利用左手介质独特的性质有望制造出尺度远

小于一个波长的谐振器、“完美”透镜、高定向天线和隐身等。目前, 左手材料在制作和使用上都有一定的难度。利用左手介质制造器件时, 会将其制成不同的形状, 如直角棱镜和对入射波有会聚作用的平凹透镜, 除了要考虑一定的加工精度, 还要对其进行切割等; 如果想得到任意形状, 将其结构单元进行旋转是否可行。本文探讨了左手介质在经过移动、切割和旋转后对原来特性的影响。

1 实现左手介质材料基本结构的理论

文献[3]指出均匀排列的细金属导线阵列(Rods)可以等效为介电系数 ϵ 为负的介质, 如图1a所示。金属阵列的等效介电系数遵循如下的形式:

$$\epsilon_{\text{eff}}^{\text{wire}}(\omega) = 1 - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\omega\gamma) \quad (1)$$

式中 ω_p 为等离子体频率; $\gamma = \epsilon_0 a^2 \omega_p^2 \sigma / \pi d^2$ 为等离

收稿日期: 2006-10-20; 修回日期: 2007-01-15

基金项目: 电波环境特性及模化技术国家级重点实验室基金(51486030305HT0101)

作者简介: 王茂琰(1979-), 女, 博士生, 主要从事电磁波在异向介质传播和散射特性方面的研究。

子体电子碰撞频率； σ 为金属导线的电导率。可以通过调整金属导线周期尺寸 a 和导线的粗细 d ，在需要的频段得到负的介电系数。

开路环谐振器阵列^[3]如图1b所示，可以构造等效 μ 和 ε 为负的介质，即：

$$\begin{cases} \mu_{\text{eff}}^{\text{SRR}}(\omega) = 1 - (\omega_{\text{mp}}^2 - \omega_{\text{m0}}^2) / (\omega^2 - \omega_{\text{m0}}^2 + i\omega\gamma) \\ \varepsilon_{\text{eff}}^{\text{SRR}}(\omega) = 1 - (\omega_{\text{p}}^2 - \omega_0^2) / (\omega^2 - \omega_0^2 + i\omega\gamma) \end{cases} \quad (2)$$

式中 ω_{mp} 为磁等离子体频率； ω_{m0} 为磁谐振频率； γ 为磁等离子体电子碰撞频率，表示其损耗特性； ω_0 为电谐振频率。同样，通过调整SRRs的环宽度 w 、环间距 s 、环开口 g ，可在需要的频段得到负的磁导系数。将图1a和多个图1b的SRR、介质板周期排列结合，可以得到左手材料，左手介质的单元结构如图1c所示。左手介质的介电系数和磁导系数可以通过提取垂直入射时的 S 参数得到：

$$\begin{cases} \mu_r \approx 2[1 - (S_{21} - S_{11})] / \{(jk_0 d)[1 + (S_{21} - S_{11})]\} \\ \varepsilon_r \approx 2[1 - (S_{21} + S_{11})] / \{(jk_0 d)[1 + (S_{21} + S_{11})]\} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $k_0 = \omega/c$ ； d 为左手介质在传播方向上的厚度。详细的推导参见文献[9]。

根据电磁理论，当介质的 ε 和 μ 同为正或负时，电磁波能够在其中传播；而当 ε 和 μ 为一正一负时，电磁波表现为倏逝波，不能在物质中传播。SRRs或Rods在负折射率频段附近均存在着传输禁带，而由二者组成的左手介质在该频段附近却存在着左手通带；若将SRRs开口 g 闭合，左手通带消失。因此可以通过将开口闭合后通带是否消失来检验通带频段是否为负折射率频段。

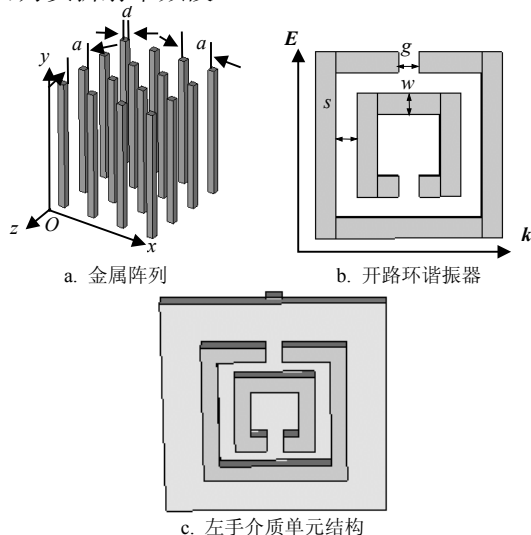


图1 金属阵列和开路环谐振器

2 仿真和讨论

基于时域有限积分法的CST microwave studio

仿真软件具有快速、精确、可以解决任意几何形状下所建立的麦克斯韦方程等优点。本文首先用CST软件仿真了左手介质棱镜的负折射现象，然后仿真了左手介质经过各种变形后的传输系数，提取了标准和移动后左手介质的有效介质参数，探讨移动、旋转、切割对左手介质透射行为的影响。

所有算例中标准(周期排列，没经过任何改动)左手介质及各种变形的介质中单个SRR的环宽度 w 、环间距 s 、环开口 g (图1b)和厚度均为0.2 mm，边长为1.8 mm；单个金属导线长度为2.8 mm，宽度、厚度为0.2 mm；单个介质板的介电系数 ε 为2.5，边长为2.8 mm，相邻介质板的距离为2.8 mm。将多个单元周期排列组成左手介质，将其放在真空单元盒子中。在 x 、 y 、 z 方向上分别设置开放、电、磁边界，即波矢量 k 沿 x 方向传播、电场 E 沿 y 方向、磁场 H 沿 z 方向，磁场垂直于 xy 平面，对SRR的作用最强。

2.1 左手介质棱镜负折射的验证

根据逆斯涅尔定律：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (4)$$

式中 n_1 、 n_2 分别为两种介质的折射率； θ_1 和 θ_2 分别代表入射角和折射角。对于左手介质和普通介质交界处发生负折射现象，由于其折射率小于零，折射波和入射波会在法线的同侧，文献[2]根据该定律设计了棱镜折射实验。电磁波与Smith结构的左手介质直角三角棱镜相互作用的示意图如图2所示。图中，虚线分别代表斜边和斜边的法线，带箭头的直线分别代表入射方向和折射方向，计算区域是 $90 \text{ mm} \times 2.8 \text{ mm} \times 105.2 \text{ mm}$ ，介质单元的横向周期为5 mm，在 y 方向仅有一个单元，设置为周期边界，棱镜直角边长105.2 mm，短边长35.2 mm，直角三角形长边与斜边夹角为 18.5° 。上述介质在不同频段下折射率不同，可能为正或者负。左手介质在频率 $f=19 \text{ GHz}$ 时的折射率为负，电磁波在穿过棱镜时确实向负方向折射。

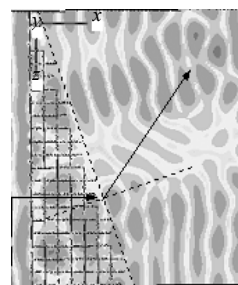


图2 左手介质棱镜的近场示意图

2.2 移动

结构单元移动的左手介质及传输系数 T 如图3所

示。图3a的计算区域为 $19.2\text{ mm}\times 14\text{ mm}\times 16\text{ mm}$ ，单元SRR分别在 xy 方向上随机地移动 $0.2\sim 0.4\text{ mm}$ ，图3b是图3a所示左手介质与周期的同样单元数标准(未经移动)左手介质传输系数的比较。

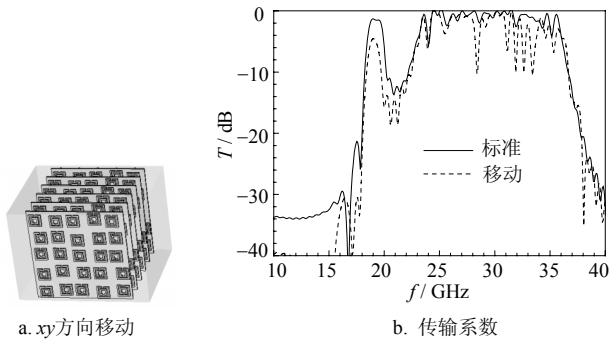
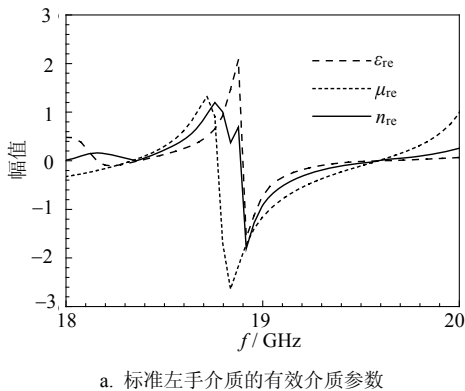


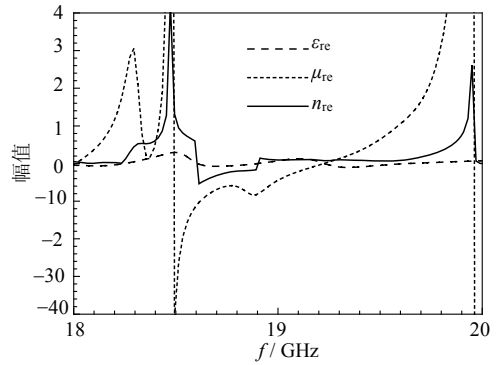
图3 结构单元移动的左手介质示意图及传输系数

定义标准左手介质谐振峰峰值点($f=18.96\text{ GHz}$ ，接近于图2中的入射波频率 $f=19\text{ GHz}$)所对应的频率为谐振峰谐振频率，谐振强度用谐振峰高度值表征，取谐振峰基线为 -13.17 dB ，定义谐振峰1/2峰高处所对应的谐振峰宽度为通频带宽。从图3b中可以看出，经过移动后的左手介质由标准左手介质的峰值 -1.297 dB 降为 -4.550 dB ，通带带宽由 1.7578 GHz 减小到 1.1198 GHz 。随着移动程度的增加，即 z 方向也发生移动，不但谐振峰的带宽和峰值均有所下降，谐振频率的位置也发生变化(限于篇幅本文未给出)，与文献[7]得出的规律一致。分析其原因是移动破坏了左手介质的周期性结构，影响了组成单元之间的耦合作用，改变了谐振条件。

图4给出了图3所示的标准及SRR移动后左手介质宏观的有效介质参数^[9]：介电常数、磁导系数和折射率。尽管图3所示的SRR移动后左手介质谐振峰的位置没有明显的变化，但比较图4a和图4b可以看出，SRR移动使左手介质的有效介质参数发生了很大的变化，不仅负折射率的频段发生了变化，其有效介质参数的值也发生了极大的变化。



a. 标准左手介质的有效介质参数

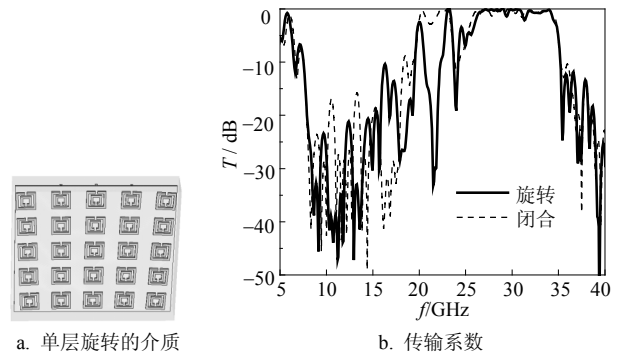


b. SRR移动后左手介质的有效介质参数
图4 左手介质的有效介质参数

2.3 旋转

左手介质旋转及传输系数如图5所示。图5a计算区域为 $15.6\text{ mm}\times 14.4\text{ mm}\times 2.8\text{ mm}$ ，是将单层左手介质的各个组成单元稍微旋转一定的角度，试图制成一个扇形；图5b给出了图5a和将图5a中SRR开口闭合两种介质的传输系数。

从图5b中看出，两种介质的谐振峰变化没有规律，甚至根本无法区分左手透射峰的位置，已经从根本上改变了左手介质的性质。分析其原因，左手介质在经过变形后，虽然整体结构改变很小，但是已经不再满足电磁波电场的方向与金属导线组成的金属阵列方向一致和电磁波磁场的方向与开路环谐振器的轴向方向一致这两个条件，故其透射特性也随之改变。



a. 单层旋转的介质
b. 传输系数
图5 左手介质旋转及传输系数

2.4 切割

左手介质切割及传输系数如图6所示。图6a的计算区域为 $14.8\text{ mm}\times 14\text{ mm}\times 2.8\text{ mm}$ ，是将标准单层左手介质在 x 方向切割后的介质。图6c的计算区域为 $14.8\text{ mm}\times 13.5\text{ mm}\times 2.8\text{ mm}$ ，是将标准单层左手介质在 y 方向切割后的介质。

图6b中实线、稀虚线、密虚线分别代表标准、图6a所示的左手介质以及将图6a中SRR的开口闭合后介质的传输系数。通过比较实线和密虚线看出，标准左手介质在 $f=20.07\text{ GHz}$ 和 $f=17.14\text{ GHz}$ 附近存

在两个左手透射峰, 开口的闭合使左手峰消失; 通过比较实线和虚线, x 方向的切割并没有使左手透射峰消失, 左手峰的位置也没有发生移动, 但其峰值在很大程度上降低了。

图6d中实线、虚线分别代表图6c所示的介质以及将图6c中SRR的开口闭合后介质的传输系数。由图可见, 切割后的介质在 $f=15.79$ GHz频段附近存在着左手透射峰。与图6b标准的左手介质相比, 左手透射峰由两个变成了一个, 且左手透射峰的位置发生了较大的移动, 峰值也相对较小。

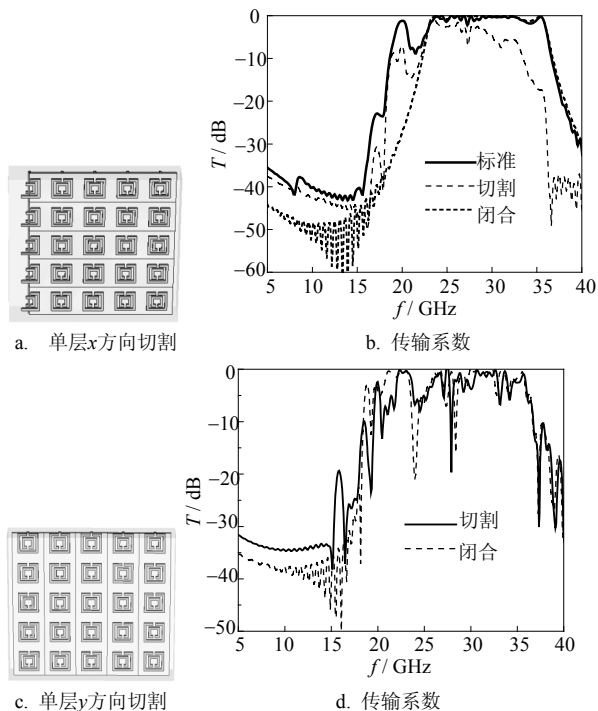


图6 左手介质切割及传输系数

3 结论

本文研究了移动、旋转、切割对左手介质传输特性的影响。通过数值计算发现: 移动使左手透射

峰峰值降低, 通带带宽减小; 如果将左手介质的组成成分按一定角度旋转, 其特性将不复存在; 对左手介质进行切割时, 不同方向的切割会产生不同的结果, 但均会破坏左手介质的左手峰, 包括峰值点的位置及峰值大小, 即改变了左手介质的固有特性。在实际器件设计中, 应该尽量保留左手介质周期结构的完整性。

参 考 文 献

- [1] VESELAGO V G. The electrodynamic of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Sov Phys Usp*, 1968, 10: 509-514.
- [2] SHELBY B A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, 292(6): 77-79.
- [3] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [4] ELEFThERIADES G V, IYER A K, KREMER P C. Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission line[J]. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2002, 50(12): 2702-2712.
- [5] 张世鸿, 陈 良, 徐彬彬, 等. 左手材料研究进展及应用前景[J]. *功能材料*, 2006, 37: 1-5.
- [6] 高正平, 刘雪晴, 范 宇. 左手媒质微波空间滤波器特性和设计[J]. *电子科技大学学报*, 2005, 35(1): 69-72.
- [7] AYDIN K, GUVEN K. Effect of disorder on magnetic resonance bandgap of split-ring resonator structures[J]. *Optics Express*, 2004, 12(24): 5896-5901.
- [8] KAFESAKI M, KOSCHNY T, PENCIU R S, et al. Left-handed metamaterials: detailed numerical studies of the transmission properties[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2005, 7(2): 12-22.
- [9] RICHARD W. ZIOLKOW S. Design, fabrication, and testing of double negative metamaterials[J]. *IEEE Trans Antennas and Propagation*, 2003, 51(7): 1516-1529.

编辑 税 红