

doi:10.3788/gzxb20134206.0688

一种新型左手材料的设计和特性研究

易强,周辅坤,骆兴芳

(江西师范大学 物理与通信电子学院;江西省光电子与通信重点实验室,南昌 330022)

摘 要:通过对左手材料的理论分析,设计了一种宽频带左手材料结构单元.该结构单元由一个矩形闭合环和十字型结构构成的谐振器和金属线组合而成.这种新结构中的谐振器实现负磁导率,金属线实现负介电常量,经过合理的设计,可以在某一频段内使得磁导率和介电常量同时为负,即具有负的有效折射率和正的波阻抗.数值仿真结果表明:在其工作频段内存在一个通带并且在 17.6~29.0 GHz 频率范围内折射率实部为负,而虚部接近于零;同时在该频率范围内波阻抗实部大于零,从而说明了该左手材料具有左手特性.除此之外,相对左手带宽达到 48.9%,远远优于传统的左手材料.

关键词:左手材料;宽频带;负折射

中图分类号:TM15

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)06-0688-4

Design and Analysis of a Kind of Novel Left-handed Metamaterial

YI Qiang, ZHOU Fu-kun, LUO Xing-fang

(School of Physics, Communication and Electronics, Jiangxi Normal University; Key Laboratory of Photoelectronics & Telecommunication of Jiangxi Province, Nanchang 330022, China)

Abstract: A novel wide-band left-handed metamaterial structure is designed based on the theory of the LHM, which is composed of a copper wire and a resonator with closed-rectangular ring which has a cross wire inside. Resonators are used to achieve negative permeability and wires are used to achieve negative permittivity in the new structure. The permeability and the permittivity are simultaneously negative, namely, the effective refraction is negative and the wave impedance is positive within certain band by proper design. Numerical simulated results show that there has a passband within operating frequency. The real part of effective refraction index is negative and the imaginary part of effective refraction index is approximately zero from 17.6 GHz to 29.0 GHz, meanwhile, the real part of wave impedance is positive within this band. The left-handed characteristic of the left-handed metamaterial is illustrated. Besides, relative left-handed bandwidth is up to 48.9%, far superior to the conventional left-handed metamaterials.

Key words: Left-handed metamaterial; Wide band; Negative refraction

0 引言

折射率是表征材料光学特性的一种简单而又普遍的方式.众所周知,自然界中材料折射率的实部均大于零,对于传统材料而言,介电常量和磁导率都为正值,电场矢量、磁场矢量和波矢量三者构成右手关

系.1968年,前苏联物理学家 V. G. Veselago^[1] 却提出了具有负折射率的左手材料这一打破常规的概念.在这种材料中,电场矢量 \mathbf{E} 、磁场矢量 \mathbf{H} 和波矢量 \mathbf{k} 遵循左手定则,相速度和群速度的方向相反,同时还指出电磁波在左手材料中传播时,具有反常 Doppler 效应、反常 Cherenkov 辐射、反常 Goos-

基金项目:江西省科技支撑项目(No. 20121BBE50028)、江西省自然科学基金(No. 20122BAB201027)和江西师范大学省光电子与通信重点实验室开放基金资助

第一作者:易强(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为左手材料. Email: yiqiang315895250@126.com

导师(通讯作者):骆兴芳(1976-),女,教授,博士,主要研究方向为频率选择表面、左手材料、电磁计算方法和优化算法.

Email: xfluo@jxnu.edu.cn

收稿日期:2012-10-09;录用日期:2013-03-18

Hänchen 位移、完美透镜效应等一系列不同寻常的物理现象. 但由于自然界中找不到这种物质, 在随后近 30 年内, 并未受到太多的关注, 更没得到深入研究. 在 2000 年, 世界上第一种人工左手材料被美国加州大学圣迭哥分校的 Smith 研究小组^[2]在实验室成功制得, 同时通过实验证明微波束在这种材料和空气的分界面上产生负折射现象, 验证了其非同寻常的负折射特性. 这激发了国内外众多学者对左手材料的兴趣, 使左手材料的研究成为光学微波等领域中的前沿和热点问题.

近年来, 根据类似的原理, 基于实现负磁导率周期性排列的金属开口环谐振器和实现负介电常量的周期性金属细线阵列构成的复合结构的各种其他样式的周期阵列结构被设计, 所得的左手材料损耗更小, 相对带宽更大. 陈红胜等^[3]研究人员设计了 S 形及双 S 形^[4], 杨晨等^[5]人设计了十字环形单元结构, D. B. Bashir^[6]设计了由三角形谐振器和置于同侧连接上下三角形的细金属棒构成的周期性结构左手材料. 在 2002 年, 另一种获得左手材料的方法被提出, C. Caloz^[7] PP 和 G. V. Eleftheriades^[8]几乎同时提出采用复合左右手传输线结构可以实现二维平面电路左手材料, 认为谐振环 (Split Ring Resonator, SRR) 的引入并不是实现负折射材料的必要条件, 通过传输线周期性加载串联电容和并联电感也可以综合设计出负折射材料. 随着人们对左手材料理论的不完善和制备等的深入研究, 对左手材料的设计而言, 不但要求具有更高的集成度、更宽的频带、更低的损耗, 还要求结构简单便于制造等, 而现有的左手材料几乎都很难同时满足以上的这些要求.

本文运用复合左右手传输线理论对谐振结构的左手材料进行等效对比和分析, 并且设计出一种由一个矩形闭合环和十字型结构构成的谐振器和金属线组合而成的新型左手材料结构. 从数值仿真得到该结构的散射参量, 并运用 Smith 的参量反演方法^[9]反演出相应的波阻抗和有效折射率参量. 结果表明, 所设计的这种新型结构相对左手带宽高达 48.9%, 与经典的 Smith 模型相比得到了显著改善.

1 新型左手材料结构设计

尽管传输线理论上存在纯左手传输线电路, 但是由于存在寄生效应, 自然界中并未发现纯左手传输线, 通常在普通传输线中加载串联电容和并联电感来实现左手传输线, 因而表现为复合左右手传输线的特性. 图 1 给出了单元理想复合左右手传输线

的等效电路模型.

图 1 中的电容 C_L 及电感 L_L 表示左手传输线的分布参量, 而电容 C_R 及电感 L_R 表示右手传输线的分布参量. 并联支路中的电容 C_R 和电感 L_L 的谐振决定了材料的等效介电常量, 串联支路中的电容 C_L 和电感 L_R 的谐振决定了材料的等效磁导率, 此电路模型整体呈现左手特性.

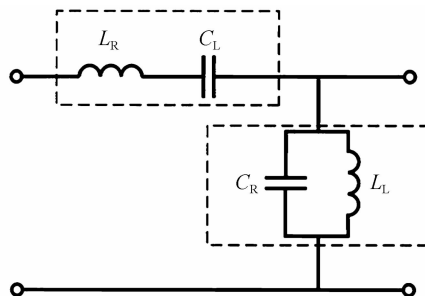


图 1 单位理想复合左右手传输线等效电路

Fig. 1 The equivalent circuit of ideal composite left and right-handed transmission line

在 1996 年 Pendry 等提出了周期排列的金属棒阵列^[10]是一种典型的电容、电感集总等效构型, 金属棒的电容值为 C_R , 金属棒的电感值为 L_L . 等离子体的介电常量表示为 Drude 模型

$$\epsilon_p(\omega) = \epsilon_0(1 - \omega_p/\omega^2) \quad (1)$$

式中金属的等离子体频率为

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{m\epsilon_0}} \quad (2)$$

式中 ϵ_0 为真空介电常量, n 为电子密度数, e 和 m 分别为电子的电量和质量. 当电磁波频率在金属线的等离子体频率下便可以用它实现负的介电常量.

本文仍然采用金属线来实现并联支路中的电容和电感, 但是串联支路中的电容和电感改用新型的谐振单元来实现, 该新型谐振器的平面图如图 2, 由矩形闭合环和十字型结构组成, 得到该组合结构. 当电磁场穿过该组合结构, 不加开口也能同时产生谐振所必需的电容和电感. 经过分析可得, 若将矩



图 2 新型谐振器平面图

Fig. 2 Layout of the novel resonator

形闭合环的各边长长度相同以及十字型的长度相同,则形成的开口大小也相同,因此得到的单元结构各开口处产生的电容 C_0 大小相等,十字结构各部分产生的电感 L_1 一样,矩形闭合环每条边产生的电感值 L_0 也一样.该新型谐振器的等效电路如图 3.

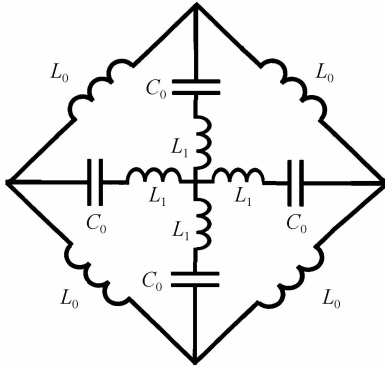


图 3 新型谐振器的等效电路

Fig. 3 The equivalent circuit of the novel resonator

由等效电路可知,该新型谐振器仍然可以实现串联支路中所需的电容和电感.

从分析可知,将该谐振结构周期阵列和金属杆周期阵列复合,可以构造出在一定频率内呈现负折射特性的电磁左手材料.

2 数值仿真与结果分析

运用商业电磁仿真软件对图 4 的结构进行数值仿真,将材料基板以及印于基板两侧的金属杆和谐振器置于真空中,三维单胞的大小即为一个周期单元的大小,与 Smith 模型单元尺寸相同,规格为 $2.5 \times 2.5 \times 2.5 \text{ mm}^3$,同时也采用相对介电常量为 4.4,损耗角正切为 0.02,厚度为 0.25 mm 的 FR4 材料作为材料基板.单元中的金属材料为铜,厚度均为 0.017 mm.金属杆的长度为 2.5 mm,宽度为 0.14 mm.谐振单元中的矩形闭合环的边长为 1.67 mm,十字型和矩形闭合环的线宽为 0.2 mm,以及它们之间的每一个开口的长度为 0.3 mm.电

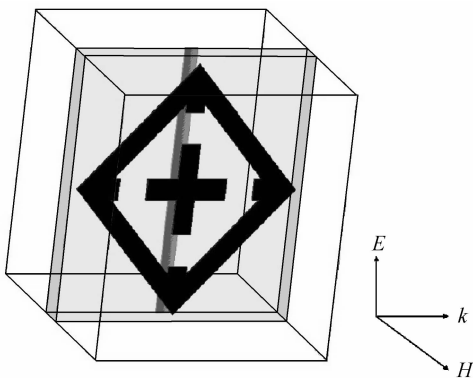


图 4 三维单胞几何构型

Fig. 4 The geometry configuration of the proposed metamaterial

磁波从模型的左端入射,入射方向、电场方向和磁场方向,垂直于电场方向的平面上设置为理想电边界,垂直于磁场方向的平面上设置为理想磁边界,随后进行数值仿真.

金属十字中心到边界的长度取变量 a ,仿真得到 a 改变时, S_{11} 随频率变化的曲线图如图 5.从图 5 可以看出,随着金属十字的长度变化,中心谐振频率将增大,但偏移量不大.

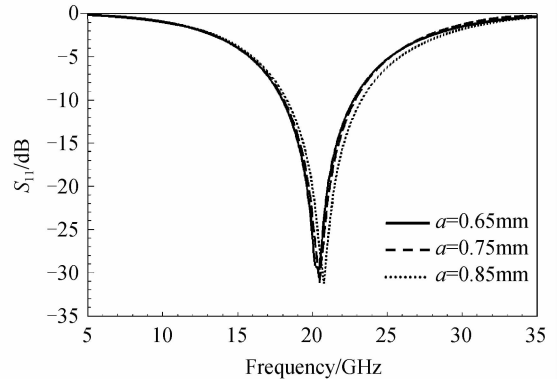


图 5 金属十字半长度对反射系数的影响

Fig. 5 The reflection coefficients for different semi-lengths of the cross wire

取 $a=0.85 \text{ mm}$,通过计算机仿真得到,该左手材料单胞散射参量 S_{11} 和 S_{21} 的幅度随频率的变化曲线如图 6.

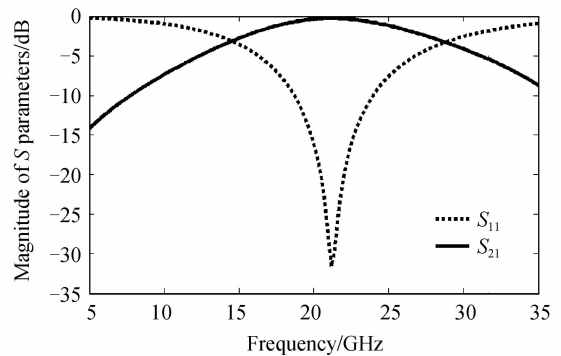


图 6 S 参量幅度值随频率的变化曲线

Fig. 6 Magnitude of S parameters v. s. frequency

从图 6 中可以看出, S_{21} 低于 -3 dB 的通带频率范围为 $14.5 \sim 29.0 \text{ GHz}$,同时在该频率范围内 S_{11} 的极大值达 -33.0 dB .由于在该通带频率附近的波长远大于单元结构尺寸,运用 Smith 的参量反演方法,根据测得的反射系数 S_{11} 和透射系数 S_{21} ,由

$$n = \frac{1}{kd} \arccos \left[\frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right] \quad (3)$$

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

式中 n 表示折射率, z 表示波阻抗, d 为左手材料平板厚度, k 为波数.从而反演出如图 7 所示的有效折射率随频率变化的曲线图.

从图 7 给出的该左手材料的有效折射率与频率的关系曲线可以看出,该左手材料 17.6~29.0 GHz 频率范围内有效折射率的实部 $\text{Re}(n)$ 为负,而虚部 $\text{Im}(n)$ 接近于零,这说明了在该频率范围内左手材料的负折射特性。

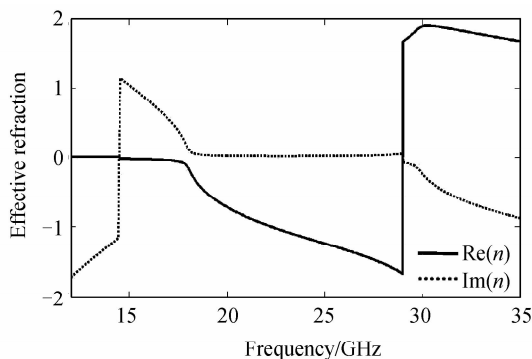


图 7 有效折射率随频率的变化曲线

Fig. 7 Effective refraction index v. s. frequency

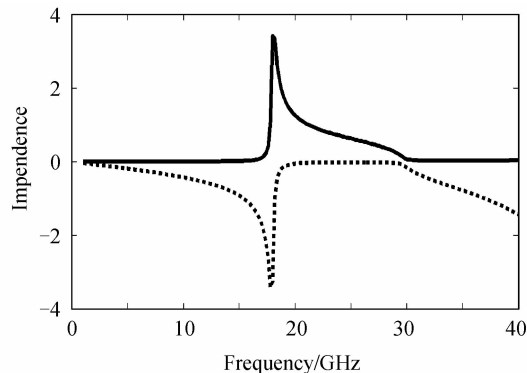


图 8 波阻抗随频率的变化曲线

Fig. 8 Impedance v. s. frequency

同时,从图 8 可知,在 17.6~29.0 GHz 频率范围内波阻抗的实部 $\text{Re}(z)$ 大于零,而虚部 $\text{Im}(z)$ 接近于零,这正是有效折射率的实部 $\text{Re}(n)$ 小于零的频段,这也说明了在此处的确存在一个左手通带。根据本构关系 $\epsilon = n/z$, $\mu = nz$ 可知,当满足有效折射率的实部小于零而波阻抗的实部大于零时,电磁参量中的磁导率和介电常量同时为负。通过计算可以得到,该左手材料的相对左手带宽达到 48.9%,而相同单元尺寸的传统 SRRs/Rod 的相对带宽仅 12.2%,其电磁性能较同尺寸的其他传统结构来说,得到了非常显著的提高。

3 结论

本文提出了一种新型的左手材料单元并对它进行了深入研究,通过商业电磁仿真软件对其进行数值仿真并得到相应的散射参量,然后提取出有效折射率参量,证实了该结构具有负折射特性及等效电路分析的合理性。结果证明在 17.6~29.0 GHz 频段出现良好的负折射效应,并且在该频率范围内具有良好的传输性能。该左手材料相对于大多其他的传统材料,结构简单便于加工制造,并且相对带宽较宽,电磁性能得到了显著提高。

参考文献

- [1] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative of ϵ and μ [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, **10**(4): 509-514.
- [2] SMITH D R, KROLL N. Negative refractive index in left-handed materials[J]. *Physical Review Letter*, 2000, **85**(14): 2933-2936.
- [3] WANG D X, RAN L X, CHEN H S, *et al.* Experimental validation of negative refraction of metamaterial composed of single side paired S-ring resonators [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(25): 254103(1)-(3).
- [4] CHEN H S, RAN L X, HUANGFU J T, *et al.* Left-handed materials composed of only S-shaped resonators[J]. *Physics Review E*, 2004, **70**(057605): 1-4.
- [5] YANG Chen, ZHANG Hong-xin, WANG Hai-xia, *et al.* Design and simulation of a cross split ring left handed materials unit structure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(16):4101-4104.
杨晨, 张洪欣, 王海侠, 等. 十字环型左手材料单元结构设计及仿真[J]. *物理学报*, 2012, **61**(16):4101-4104.
- [6] BASHIR D B, MOHAMAD K A R, MURAD N A, *et al.* Design and analysis of metamaterial antenna using triangular resonator[C]. *Proceedings of APMC 2012, Taiwan*, 2012: 577-579.
- [7] LIU L, CALOZ C, CHANG C C, *et al.* Forward coupling phenomena between artificial left-handed transmission lines [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, **92**(9): 5560-5565.
- [8] ELEFThERIADES G V, IYER A K, KREMER P C. 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.
- [9] SMITH D R, VIER D C, KOSCHNY T H, *et al.* Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials[J]. *Physics Review E*, 2005, **71**(036617): 1-11.
- [10] 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.