

一种新型的宽频带低损耗左手材料结构设计

沈纯纯, 李民权, 周永光, 李玄玄, 汪善栋, 潘旭

安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230601

摘要 基于谐振型左手材料理论,提出了一种新型的宽频带、低损耗左手材料结构单元。利用 Nicolson-Ross-Weir 算法和 Ansoft HFSS 软件,得到该结构单元的等效介电常数、等效磁导率和等效折射率。结果表明,该结构单元具有低损耗特性;在 23~32.3 GHz 频段范围内,其等效介电常数和等效磁导率均为负,同时等效折射率的实部为负,虚部接近于 0。该结构为单元 $K\alpha$ 波段左手材料的设计及其应用提供了一定的参考。

关键词 材料;左手材料; $K\alpha$ 波段;低损耗;宽频带

中图分类号 O441.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.091602

Novel Structure Design of Left-Handed Material with Broadband and Low Loss

Shen Chunchun, Li Minquan, Zhou Yongguang, Li Xuanxuan, Wang Shandong, Pan Xu

Key Laboratory of Intelligent Computing and Signal Processing, Ministry of Education, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China

Abstract Based on the theory of resonant-type left-handed materials, a novel structural unit of left-handed materials with broadband and low loss is proposed. By using the Nicolson-Ross-Weir algorithm and the Ansoft HFSS software, the equivalent permittivity, the equivalent permeability and the equivalent refractive index of the structural unit are obtained. The results show that the proposed structural unit has a low loss characteristic. In the frequency range of 23-32.3 GHz, both the equivalent permittivity and the equivalent permeability of the proposed structural unit are negative, meanwhile, the real part of the equivalent refractive index is negative while the imaginary part is close to zero. The proposed structural unit can provide a certain reference for the design and application of left-handed materials in the $K\alpha$ band.

Key words materials; left-handed materials; $K\alpha$ band; low loss; broadband

OCIS codes 160.4670; 350.3618; 090.2910; 280.1350

1 引言

20 世纪 60 年代后期, Veselago^[1] 根据麦克斯韦方程组提出了左手材料(等效介电常数和等效磁导率同时为负)理论。直至 21 世纪初期, Smith 等^[2] 在 Veselago 的研究理论上,提出了开口谐振环产生的磁谐振和金属线产生的电谐振理论,并提出了一种利用谐振环和金属线的组合能实现双负的阵列结构。此后,左手材料成为国内外研究的热点之一。左手材料具有制作工艺简单、易于小型化以及电磁特性奇异等特点,其在微波器件领域的应用^[3-4] 备受关注。

刘亚红等^[5] 提出了一种能够产生双负特性的 H 形结构。李文强等^[6] 提出了一种斜三角开口对环的双面左手材料结构,左手频带为 3.9 GHz,单元损耗低于 5 dB。宋一川等^[7] 提出了一种双面互联圆盘的左手材

收稿日期: 2017-03-21; 收到修改稿日期: 2017-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(51477001)

作者简介: 沈纯纯(1991—),女,硕士研究生,主要从事超材料方面的研究。E-mail: 2211525957@qq.com

导师简介: 李民权(1968—),男,博士,教授,主要从事天线与馈电以及微波器件方面的研究。

E-mail: limq@ahu.edu.cn(通信联系人)

料结构,该结构具有宽带特性,其左手带宽达到 1.36 GHz。杨晨等^[8]提出一种十字环型左手材料单元单面刻蚀结构,其左手频带仅为 0.1 GHz。

为了提高左手频带及降低单元损耗,本文根据金属线产生电谐振及开口环产生磁谐振的设计原理,提出了一种基于多开口圆环和金属十字形组合的新型左手单元结构。在理论分析和 Ansoft HFSS 软件仿真的基础上,采用 NRW(Nicolson Ross Weir)方法^[9-11]对单元结构进行仿真,得到其有效电磁参数。结果表明,在 23~32.3 GHz 频段范围内,该结构的等效介电常数和等效磁导率同时为负,呈现左手特性。与传统左手材料相比,本文设计的结构小型化,其左手频带更宽,单元损耗更低。

2 左手材料单元理论模型与分析

根据电磁感应定律,在一定频率下,当电磁波平行入射结构单元时会产生谐振回路,激发出电谐振和磁谐振,进而在结构单元内部激发形成电等离子体^[7]。如果产生磁谐振的频段和产生电谐振的频段发生重合,那么该材料的等效介电常数 ϵ 和等效磁导率 μ 同时为负,即表现为左手特性。所设计的左手单元结构如图 1(a)所示,介质板材料等效介电常数为 3.48,厚度为 0.508 mm。左手材料单元外圆半径为 1.25 mm,内圆半径为 1.05 mm,圆环的开口间距为 0.1 mm,中心十字形条长度均为 2 mm,十字形条金属线宽为 0.1 mm。

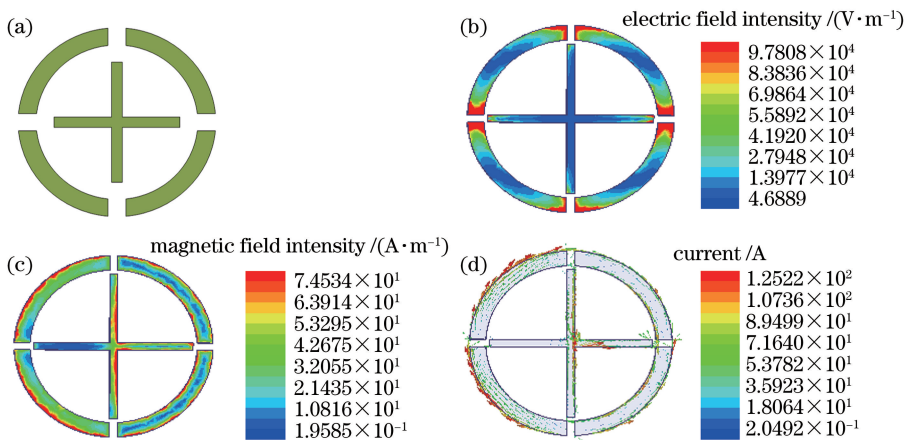


图 1 左手材料的(a)单元结构模型及(b)电场、(c)磁场和(d)电流分布图

Fig. 1 (a) Unit structure model and (b) electric field, (c) magnetic field and (d) current distribution of left-handed materials

Pendry 等^[12]利用金属线阵列实现了负的等效介电常数。因此,单元结构中十字形金属线的存在,使单元结构在一定频率的电磁波入射下能够产生电谐振。由文献^[13]可知,开口环结构能使单元结构产生磁谐振。从图 1(b)~(d)可以看出,电场主要分布在开口谐振环处;磁场分布主要集中在垂直于开口环所在的平面上,可激发出很强的磁谐振;单元的内外环及金属线的电流分布相反,电谐振互相抵消,因而电场主要是由磁谐振的二次激励产生的。

3 左手材料结构的仿真设计

图 2 所示为设计的左手结构周期模型,每个单元间的距离为 0.1 mm。使用波导模拟器方法,令电磁波沿着 Y 轴方向平行入射结构平面,沿着 X 轴方向的两个面壁设置为理想电边界,沿着 Z 轴方向的两面壁设置为理想磁边界。借助 Ansoft HFSS 商业软件,对单元结构和周期结构进行仿真,仿真结果如图 3,4 所示,其中 S_{11} 为回波损耗, S_{21} 为插入损耗。

从图 3(a)和图 4(a)的仿真曲线上可以看出, $S(S_{11}, S_{21})$ 参数的幅度与相位在频率为 24 GHz 处同时发生突变。从图 3(b)和图 4(b)仿真曲线看出, S 参数的幅度与相位在 13.5 GHz、25 GHz 两个频率处均发生突变。根据文献^[13]可知, S 参数突变意味着突变频点处存在左手频带。

为了保证数据的准确性,根据 NRW 算法^[10]得到单元结构等效参数。NRW 算法可表示为

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

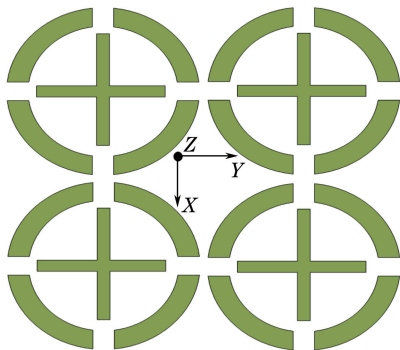


图 2 左手材料周期结构仿真模型

Fig. 2 Simulation model for periodic structure of left-handed materials

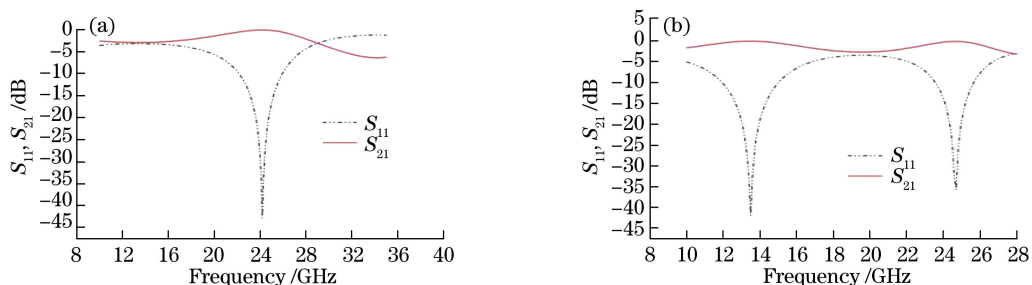


图 3 (a)单元结构和(b)周期结构的 S 参数幅度曲线

Fig. 3 Amplitude curves of S-parameters of (a) unit structure and (b) periodic structure

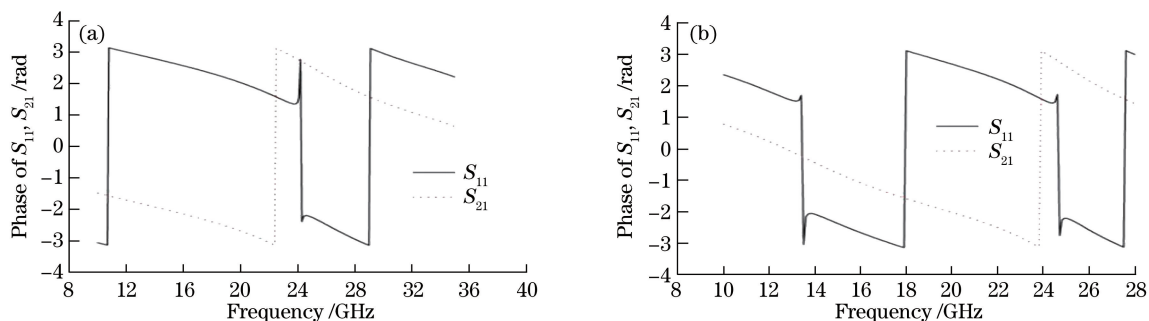


图 4 (a)单元结构和(b)周期结构的 S 参数相位曲线

Fig. 4 Phase curves of S-parameters of (a) unit structure and (b) periodic structure

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

$$\epsilon = n/Z, \quad (3)$$

$$\mu = n \times Z, \quad (4)$$

式中 k 为入射电磁波的波数, n 为等效折射率, d 为左手材料厚度, Z 为等效阻抗。将 S_{11} 和 S_{21} 代入 (1)~(4) 式, 得到的各等效参数如图 5 所示。结果表明, 单元结构等效参数在 24 GHz 后, 皆从正数方向突变到负数方向, 表明设计的单元结构能够实现很好的左手特性。

表 1 等效材料参数为负时对应的频率范围

Table 1 Frequency range corresponding to negative equivalent material parameters

Equivalent material parameter	Frequency /GHz
$\epsilon < 0$	19.2-35
$\mu < 0$	23-32.3
$n < 0$	21.1-34.9

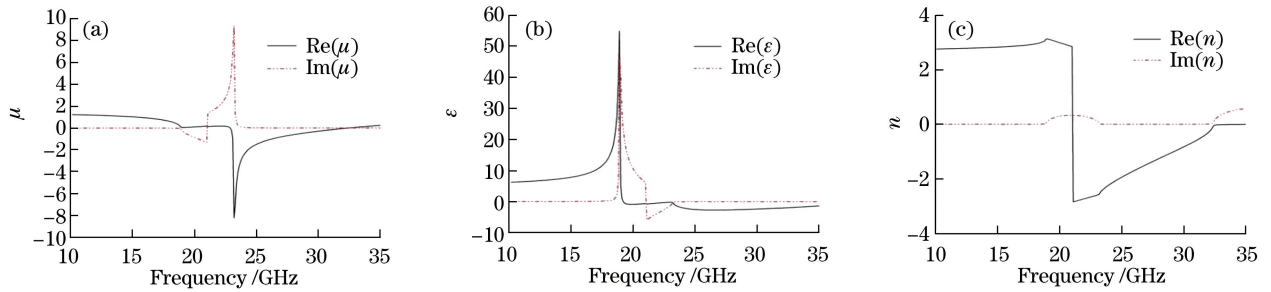


图 5 单元结构的等效参数。(a)等效磁导率;(b)等效介电常数;(c)等效折射率

Fig. 5 Equivalent parameters of unit structure. (a) Equivalent permeability; (b) equivalent permittivity; (c) equivalent refractive index

表 1 所示为等效电磁参数为负时对应的频率范围,可以看出,设计的左手结构在 23~32.3 GHz 双负频段内,其绝对带宽达到 9.3 GHz。

为了衡量结构损耗,引入品质因素 f_m ^[14], f_m 越大,代表损耗越小。其定义式为

$$f_m = \left| \frac{\text{Re}(n)}{\text{Im}(n)} \right|. \quad (5)$$

由(5)式得到结构的损耗曲线如图 6 所示,可以看到,在左手频段 23~32.3 GHz 范围内, f_m 在 307 到 6 之间波动,在双负频段外, f_m 接近于 0。由此可知,该结构具有低损耗性。

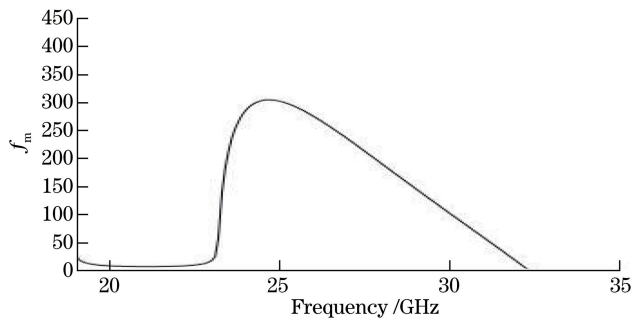


图 6 左手频域的损耗曲线

Fig. 6 Loss curve in left-handed frequency domain

4 结 论

基于 Pendry 提出的谐振型左手材料理论,设计出了一种新型的超宽带、低损耗的左手特性材料结构。利用 NRW 算法和 Ansoft HFSS 软件,得到了该结构的等效介电常数、等效磁导率和等效折射率参数。结果表明,在 23~32.3 GHz 范围内,该结构具有双负特性、宽带通特性及更低的损耗。该左手材料为 K α 波段微波左手材料的设计及其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 values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509.
- [2] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, *et al.* Composite medium with simultaneously negative permittivity and permeability[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [3] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. Physical Review Letters, 2000, 85(18): 3966-3969.
- [4] Ma H, Qu S, Xu Z, *et al.* Material parameter equation for elliptical cylindrical cloaks[J]. Physical Review A, 2008, 77(1): 013825.
- [5] Liu Yahong, Luo Chunrong, Zhao Xiaopeng. H-shaped structure of left-handed metamaterials with simultaneous negative permittivity and permeability[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(10): 5883-5889.

- 刘亚红, 罗春荣, 赵晓鹏. 同时实现介电常数和磁导率为负的 H 型结构单元左手材料[J]. 物理学报, 2007, 56(10): 5883-5889.
- [6] Li Wenqiang, Cao Xiangyu, Gao Jun, *et al.* Broadband and low-loss left-handed metamaterial composed of oblique triangular open-loop pairs resonator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(15): 154102.
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.
- [7] Song Yichuan, Ding Jun, Guo Chenjiang, *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.
- [8] Dong Huaijing, Geng Youlin. 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.
- [9] Smith D R, Vier D C, Koschny T, *et al.* Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials[J]. *Physical Review E*, 2005, 71(3): 036617.
- [10] Ziolkowski R W, Kipple A D. Application of double negative materials to increase the power radiated by electrically small antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2003, 51(10): 2626-2640.
- [11] Szabo Z, Park G H, Hedge R, *et al.* A unique extraction of metamaterial parameters based on Kramers-Kronig relationship[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2010, 58(10): 2646-2653.
- [12] 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.
- [13] Yang Huai, Wang Chunhua, Guo Xiaorong. 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.
- [14] Jin Dalin. 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.