

用于毫米波通信的双频带 S 型左手材料

易 强¹ 周辅坤² 张 蒙¹ 骆兴芳¹

(¹ 江西师范大学物理与通信电子学院微纳材料与传感工程实验室, 江西 南昌 330022)
² 三明学院物理与机电工程学院, 福建 三明 365004)

摘要 毫米波通信是当前研究热点之一, 并受到了广泛的关注。提出了一种可用于毫米波通信的具有双频带的左手材料, 该结构单元由上下两环不对称的 S 型结构反向印制在介质基板的两侧组成。通过合理选择单元的结构参数并对尺寸进行优化, 该结构可获得在 50 GHz 和 60 GHz 附近具有两个透射峰的 S 参数, 经反演法电磁参数提取, 验证了在 48.2~52.2 GHz 和 58.7~60.8 GHz 这两个频带范围内磁导率和介电常数同时为负, 表现出典型的左手特征。本研究对多频带左手材料设计及其在毫米波通信中的应用具有一定的参考意义。

关键词 材料; 左手材料; 双频带; S 型结构; 毫米波通信

中图分类号 O441.6 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0416003

Dual-Band S-Shaped Left-Handed Material for Millimeter Wave Communication Application

Yi Qiang¹ Zhou Fukun² Zhang Meng¹ Luo Xingfang¹

¹ *Laboratory of Nanomaterials and Sensors, School of Physics, Communication and Electronics of Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330022, China*
² *Department of Physics and Electromechanical Engineering of Sanming University, Sanming, Fujian 365004, China*

Abstract Millimeter wave communication has been a focal point of research currently and become more and more attractive. A dual-band left-handed material structure is proposed for the application of millimeter wave communication. The structure cell is composed of two S-shaped conductor planes with upper and lower asymmetric rings, which are printed reverse of each other on both sides of the dielectric substrate. Through choosing and optimizing the structural dimensions reasonably, the S parameter values with two transmission peaks at about 50 GHz and 60 GHz are obtained. The corresponding electromagnetic parameters are calculated by the S parameters inversion algorithm. Simulated results demonstrate that permittivity and permeability are simultaneously negative from 48.2~52.2 GHz and 58.7~60.8 GHz where the typical left-handed characteristic is shown. The research has certain reference significance for the design of multi-band left-handed material and millimeter wave communication application.

Key words materials; left-handed material; dual-band; S-shaped structure; millimeter wave communication

OCIS codes 350.3618; 160.3918; 160.4670; 160.1245

1 引 言

左手材料是一种在一定频段下同时具有负磁导率和负介电常数的人工合成媒质材料, 许多众所周

知的物理规律在左手材料中均表现出超常的光学现象, 如逆多普勒效应, 逆 Cerenkov 效应, 逆斯涅耳效应等, 从而受到人们的青睐。随着 2001 年世界上第

收稿日期: 2013-10-11; 收到修改稿日期: 2013-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(51361013)、江西省自然科学基金(20122BAB201027)、江西省科技支撑项目(20121BBE50028)

作者简介: 易 强(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事左手材料方面的研究。E-mail: yiqiang315895250@126.com

导师简介: 骆兴芳(1976—), 女, 博士, 教授, 主要从事频率选择表面、左手材料、电磁计算方法和优化算法等方面的研究。E-mail: xfluo@jxnu.edu.cn(通信联系人)

一块人工左手材料的成功制备与实验验证和 2002 年采用微带左手传输线^[1]实现左手材料的新方法被提出,促使左手材料成为物理学、材料科学与电磁学等领域的研究前言和热点,众多新型的左手材料结构相继被提出,如双 Z 型^[2]、旋转共轭希腊十字型结构^[3]、平行金属双柱结构^[4]等。大多数左手材料研究的工作频率都集中在微波段。然而左手材料的特殊性质不仅仅限于微波频段,近年来,研究专家正在把左手材料的工作频率向毫米波、Terahertz 及光波段推进。目前,工作在毫米波段的左手材料^[5]已经被提出,但此前所提出的结构大都仅具有一个左手传输通带,对需要工作在多频带的器件带来不便,大大地限制了左手材料的应用。为实现双频带或多频带具有左手特性,Eleftheriads 等^[6]提出基于传输线具有两个左手频段的左手材料,常用的方法是将几个不同大小或不同结构的左手材料组合起来形成一个复合单元^[7-10],但是这不利于结构的小型化。

Chen 等^[11]提出 S 型左手材料,并由 S 型结构的左手材料构造出多种衍生结构^[12-13],获得了在双频带和多频带具有左手特性,但扩展的 S 型单元尺寸和原有的 S 型结构单元相比较,结构尺寸相对而言增大不少。但 S 型结构左手材料无需增加额外的金属棒,便可以实现左手特性,且具有稳定的电磁特性、频带宽、损耗低等优点。本文在对 S 型左手材料已有的研究基础上,通过改变上下两环的尺寸,使 S 型的上下两环不对称,提取该结构的 S 参数,并采用 S 参数反演法得到该左手材料的折射率和阻抗等参数。数值仿真结果表明,这种结构的左手材料在 48.2~52.2 GHz 和 58.7~60.8 GHz 内磁导率和介电常数同时为负,相对左手带宽分别约为 8% 和 3.5%,表现出典型的左手特征,为多频带左手材料在毫米波通信中的应用提供了参考。

2 S 型左手材料分析

S 型左手材料的单元结构如图 1 所示,将两个 S 型结构反向放置在介质基板的两侧,构成一个类似“8”形状。横电磁(TEM)波沿 y 轴从模型左端入射,电场和磁场的方向如图 1 所示。

当外磁场垂直穿过该 S 型谐振结构时,上中下三组水平金属条之间的等效电容 C_1 、 C_m 和 C_2 均对磁谐振频率起作用,此结构单元包含两个环路,感应电流穿过水平金属条之间的等效电容沿着上下两环流动。而在外电场的激励下,弯曲的 S 型金属结构比直金属棒具有更大的电场,由此引起的电谐振频

率将低得多,使负介电常数频段和负磁导率频段重合。其等效电路如图 2 所示。

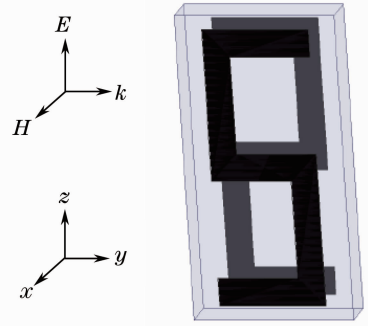


图 1 S 型左手材料单元结构

Fig. 1 Unit cell of S-shaped left-handed material structure

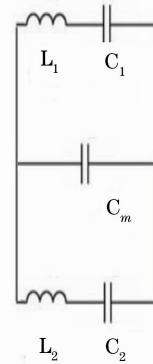


图 2 左手单元结构等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of left-handed unit cell

3 双频带左手材料数值模拟

当单个 S 型结构的上下两个环不对称时,如图 3 所示。

当电场方向上的两个波导壁长度不等时,上下两个环的磁通面积也不相等,在两个环中形成两个

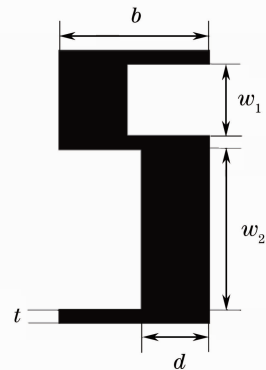


图 3 上下环不对称的 S 型结构版图

Fig. 3 Layout of S-shaped structure with upper and lower asymmetric rings

大小不等的感应电流。当水平金属条的宽度一致时,所引起的等效电容 C_1 、 C_2 和 C_m 大小相等,而等效电感 L_1 和 L_2 不同。根据图 2 中等效电路分析可知,将出现两个不相等的磁谐振点。两个上下环不对称 S 型结构反向放置在介电常数为 2.2 厚度为 0.105 mm 的介质基板两侧,电磁波传播方向和电磁场方向如图 1 所示。与电场方向垂直的两个边界设置为理想电边界,与磁场方向垂直的两个边界设置为理想磁边界。通过对其他参数的调节和优化,使该模型的响应频段在毫米波段。为了使该左手材料可用于 60 GHz 通信,其一响应频率的中心频率为 60 GHz,设计并优化后的其他结构参数如下(单位:mm): $b=1.1, d=0.5, t=0.1, \omega_1=0.505, \omega_2=1.13$ 。

通过电磁仿真得到 S 参数的幅度曲线和相位曲线分别如图 4 和图 5 所示。

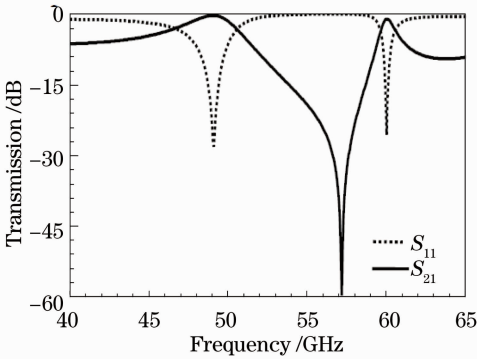


图 4 S 参数幅度曲线

Fig. 4 Magnitude of S parameters curve

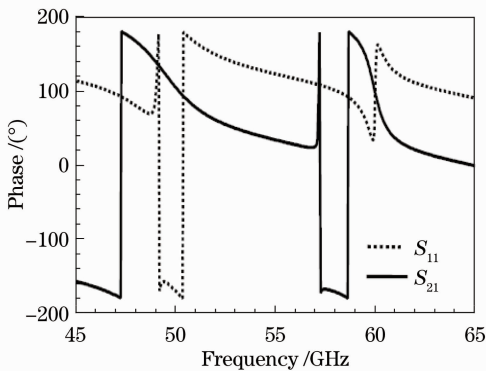


图 5 S 参数相位曲线

Fig. 5 Phase of S parameters curve

从图 4 中可以看出,在 50 GHz 和 60 GHz 附近出现两个透射峰,且回波损耗 S_{11} 也都在 -25 dB 以上。而从图 5 可以看到,在两个透射峰附近 S_{11} 和 S_{21} 的相位都发生突变。然而,仅从 S 参数无法直观

地看出其左手特性。由于单胞尺寸 d 小于 $\lambda/4$ (λ 为在频率为 60 GHz 时的工作波长),能用等效介质描述。为了验证这两个通带是否为左手频带,可以运用 S 参数反演法^[14]提取等效电磁参数。

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

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

式中 n 为折射率, k 为入射波的波数, d 为结构的单胞尺寸, z 为波阻抗。由本构关系

$$\epsilon = n/z, \quad \mu = nz. \quad (3)$$

由上述(1)、(2)和(3)式可得,当折射率 $n < 0$ 和 $\text{Re}(z) > 0$ 时,磁导率和介电常数均为负。根据 S 参数提取的折射率曲线和波阻抗曲线分别如图 6 和图 7 所示。

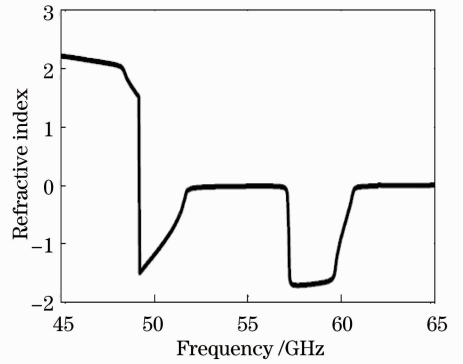


图 6 折射率曲线

Fig. 6 Refractive index curve

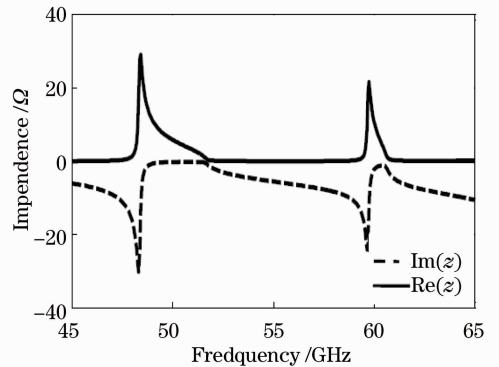


图 7 波阻抗曲线

Fig. 7 Wave impedance curve

从折射率曲线和阻抗曲线可知,该 S 型左手材料存在两个磁导率和介电常数同时为负的频带,具体电磁参数随频率变化的分布情况如表 1 所示。

表 1 电磁参数随频率变化的分布情况

Table 1 Distribution of electromagnetic parameters versus frequency

Effective electromagnetic parameters	Frequency (unit: GHz)
$n < 0$	48.2~52.2 and 57.0~60.8
$\text{Re}(\varepsilon) > 0$	46.6~52.2 and 58.7~61.3
$\mu < 0$ 且 $\varepsilon < 0$	48.2~52.2 and 58.7~60.8

4 结 论

在传统 S 型左手材料的基础上,利用 S 型结构上下两环不对称时将产生两处不同的谐振,得到了一种可用于毫米波通信的 S 型左手材料。由 S 参数反演得到的折射率和阻抗曲线可知,在 48.2~52.2 GHz 和 58.7~60.8 GHz 频率范围内,介电常数和磁导率同时为负,在两个频带内均表现出典型的左手特征—双负特性。该研究对双频带左手材料设计及多频带左手材料在毫米波功能器件中的发展具有一定的参考意义和应用前景。

参 考 文 献

- 1 C Caloz, T Itoh. Application of the transmission line theory of left-handed (LH) materials to the realization of a microstrip "LH line"[C]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002, 2: 412-415.
- 2 Wang Haixia, Lü Yinghua, Zhang Hongxin, *et al.*. Study on double incidence left-handed material composed of double Z-shaped metal strips [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(3): 0341011.
王海侠, 吕英华, 张洪欣, 等. 基于双 Z 型金属条的双入射型左手材料研究[J]. 物理学报, 2011, 60(3): 0341011.
- 3 Yang Fangqing, Li Jie, Wang Zhan, *et al.*. Characteristics of the twisted conjugated gammadion chiral structure [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1016002.
杨方清, 李 杰, 王 战, 等. 旋转共轭希腊十字型手征结构特

性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1016002.

- 4 Liang Lanju, Yan Xin, Yao Jianquan, *et al.*. Two-dimensional left-handed material based on parallel metallic double rods in terahertz wave [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0316001.
梁兰菊, 闫 昕, 姚建铨, 等. 基于平行金属双柱的太赫兹波二维左手材料[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0316001.
- 5 Zhou Fukun, Yi Qiang, Luo Xingfang. A kind of S-type structure of left-handed materials for 60 GHz communication [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(2): 423-426.
周辅坤, 易 强, 骆兴芳. 一种用于 60 GHz 通信的 S 型左手材料的设计[J]. 光子学报, 2013, 42(2): 423-426.
- 6 G V Eleftheriades. A generalized negative-refractive-index transmission-line (NRI-TL) metamaterial for dual-band and quad-band applications [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, 17(6): 415-417.
- 7 Du Qiujiao, Liu Jinsong, Wang Kejia, *et al.*. Dual-band Terahertz left-handed metamaterial with fishnet structure [J]. Chin Phys Lett, 2011, 28(1): 0142011.
- 8 Li Minhua, Yang Helin, Lin Hai, *et al.*. Design, measurement, and characterization of dual-band left-handed metamaterials with combined elements [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2013, 55(3): 493-497.
- 9 Zhong Jingping, Huang Yongjun, Wen Guangjun, *et al.*. Tunable dual-band negative refractive index metamaterial consisting of ferrites and SRR-wire [J]. Procedia Engineering, 2012, 29(7): 797-801.
- 10 Chen Cheng, Yang Rongcao, Xue Wenrui, *et al.*. Design of a novel dual-band left-handed material [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(s1): s116006.
陈 诚, 杨荣草, 薛文瑞, 等. 一种新型双频带左手材料的设计[J]. 光学学报, 2012, 32(s1): s116006.
- 11 Chen Hongsheng, Ran Lixin, Huangfu Jiangtao, *et al.*. Left-handed materials composed of only S-shaped resonators [J]. Phys Rev E, 2004, 70(5): 0576051.
- 12 Chen Hongsheng, Ran Lixin, Huangfu Jiangtao, *et al.*. Metamaterial exhibiting left-handed properties over multiple frequency bands [J]. J Appl Phys, 2004, 96(9): 5338-5340.
- 13 Wang Dongxing, Ran Lixin, Wu Baeian, *et al.*. Multi-frequency resonator based on dual-band S-shaped left-handed material [J]. Opt Express, 2006, 14(25): 12288-12294.
- 14 D R Smith, D C Vier, T H Koschny, *et al.*. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials [J]. Phys Rev E, 2005, 71(3): 0366171.

栏目编辑: 李志兰