

doi: 10. 3788/gzxb20134204. 0423

一种用于 60 GHz 通信的 S 型结构左手材料的设计

周辅坤, 易强, 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: 基于对 S 型结构的理论分析, 将中心频率设置为 60 GHz, 通过合理的改变单元结构中相应的尺寸以实现所需电谐振和磁谐振频率, 并且经过优化以实现负介电常量和负磁导率的重合频段尽可能理想. 运用反演参量提取方法进行电磁参量提取, 可以得到本设计在 58.1~61.4 GHz 频段内其 ϵ 和 μ 同时为负, 即左手频段. 分析散射参量的仿真结果, 在 58~62 GHz 频段内 S_{21} 大于 -3 dB, 在 59.8~60.4 GHz 频段内, S_{11} 小于 -20 dB, 因此该设计结果可以运用于 60 GHz 通信滤波器和天线等器件的研究与设计.

关键词: 左手材料; S 型左手结构; 60 GHz 通信

中图分类号: TN015

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)04-0423-4

A Kind of S-type Structure of Left-handed Materials for 60 GHz Communication

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

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

Abstract: The S-typed LHM is selected as design objective. The center frequency of S-typed structure is set as 60 GHz. By reasonably varying the corresponding parameters size of unit structure, the required electric resonance and magnetic resonance frequency can be obtained. Based on the theoretical analysis of S-typed structure, the coincidence frequency of negative permeability and permittivity can be optimized as possible as ideal. The dielectric constant of substrate can effect the characteristic and stability of LHM. In this paper, the dielectric constant is set as 2.2. The electromagnetic parameters are extracted using NRW method. The negative ϵ and negative μ index can be obtained in the band from 58.1 GHz to 61.4 GHz which is proved as left-hand band. From the simulation results of scattering parameters, it can be observed that the S_{21} values are greater than -3 dB with the frequency range from 58 GHz to 62 GHz and the S_{11} values are less than -20 dB with the frequency range of 59.8~60.4 GHz. Therefore, the results can be referred as the design of filter and antenna for 60 GHz communication.

Key words: Left-handed metamaterial; S-typed structure; 60 GHz communication

0 引言

左手材料是一种等效介电常量和磁导率同时为负的人工周期结构材料^[1], 在自然界中并非天然存

在. 自 1968 年 Veselago 首次提出左手材料的概念以来, 越来越多的左手结构被研发出来并且运用到各类微波器件、天线等方面. 浙江大学陈红胜等人在 2004 年设计出了一种结构简单并且相对带宽可

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: 周辅坤 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为左手材料. Email: wdyb365206@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、电磁计算方法等. Email: xfluo@jxnu.edu.cn

收稿日期: 2012-10-09; 录用日期: 2012-11-26

以达到其它结构左手材料两倍以上S型结构单元^[2]；之后，陈杭生等人在S型结构的基础上提出的弓字型的左手结构能实现在两个不同的频段实现负折射^[3]。

随着无线接入、移动多媒体业务的迅速发展，用户对同时语音、图像和数据服务以及高速无线通信容量和需求与日俱增，这为60 GHz通信的研究提出了广阔的市场需求，同时也因其具有抗干扰性、较高安全性、国际通用性和频带宽、免许可证等优点而越来越受青睐^[4]。因此，当前已经有许多科研人员也着力于将左手材料运用在60 GHz通信。本文通过设计和优化S型结构的尺寸同时改变结构中基板介电常量，在60 GHz左右获得3.3 GHz的左手频段，并且其相对带宽可以达到5.5%。

1 分析和设计S型单元结构

传统的Smith模型左手结构是由开口谐振环(Split-Ring Resonator, SRR)+金属棒构成。SRR环产生等效的负磁导率，金属棒产生等效的负介电常量，当二者在某个频段同时为负时，在该频段便产生左手特性^[3-5]。与Smith模型相比较，S型左手结构较为简单而且无需加入额外的金属棒就能实现等效负的介电常量。在性能方面，S型结构还具有结构稳定、损耗小的特点^[6-9]，其结构如图1。

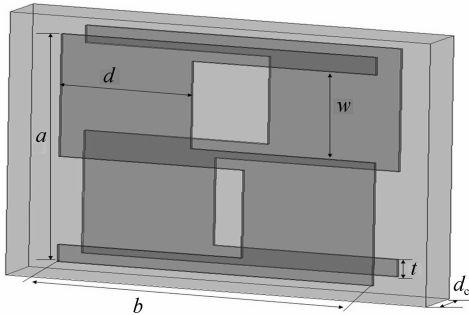


图1 S型左手材料内部结构

Fig. 1 The structure of the S-typed left-handed material

从图1中可以看出把传统的两个S分别印制在介质基板的两侧，形成“8”字形图案。在外部电场的激励下便形成两个振荡回路。介质基板的介电常量为2.2，其尺寸为： $d_c=0.1$ ， $b=1.1$ ， $d=0.5$ ， $t=0.1$ ， $w=0.505$ ， $a=1.3$ (单位均为mm)。

当电磁波在S型结构单元中传播时，与电场E方向相同的金属可以等效成金属棒。在磁场方向上，S之间可等效为SRR环，其等效模型如图2。

通过分析可以知道，因为S结构的上下振荡环尺寸相同，从而具有相等的感应电动势^[10-11]，其公式为

$$U = i\omega\mu_0 H_0 (h - 2 * d)w \quad (1)$$

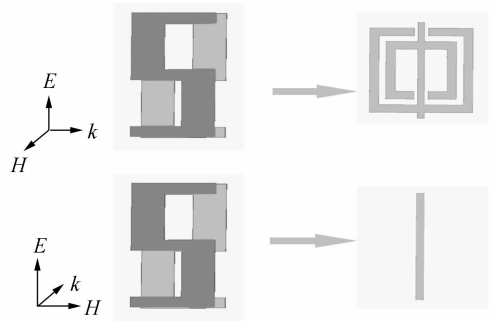


图2 电磁波入射时的等效模型

Fig. 2 The equivalent model with the incidence of electromagnetic waves

根据分析可以得出等效电容为

$$C = \epsilon \frac{ht}{d_c} \quad (2)$$

等效电感为

$$L = \frac{m_0 \omega (b - 2 * d)}{l} \quad (3)$$

通过S型结构的理论分析和计算，可以推导出该结构的谐振点为

$$\omega_{m_0} = \sqrt{\frac{3}{LC}} \quad (4)$$

磁等离子频率为

$$\omega_{m_p} = \omega_{m_0} = \sqrt{\frac{1}{1 - 2 \frac{\omega(h - 2 * d)}{ab}}} \quad (5)$$

通常情况下，左手结构的负磁谐振频率往往要低于负的电谐振频率。本文将中心频率设定为60 GHz。根据以上公式可以得知，通过改变模型中结构尺寸参量从而在60 GHz左右获得负磁导率。同时，从仿真分析中也可以得知当增大图1结构中的d时，可以减低其电荷密度同时其自感效应被增大，这样可以减低结构的电谐振来获得60 GHz左右频段的等效负介电常量，从而获得左手频段。基板作为结构的一部分，其厚度也对左手特性起着影响。当基板厚度越小，其谐振点越往低频移动，并且其介电常量越低，性能也就越好。本文中的单元结构如图3。

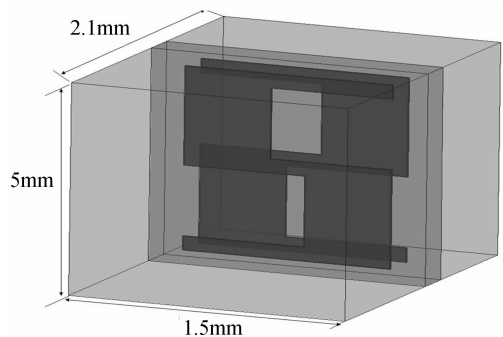


图3 S型结构单元

Fig. 3 The unit cell of S-typed structure

图 3 中上下表面为 PEC,前后表面为 PMC. 为获得该单元的介电常量和磁导率,可以依据公式 $\epsilon = n/z$, $\mu = nz$, 计算得出. 根据散射参量 S_{11} 和 S_{21} 的情况下可以利用反演参量提取方法(Nicolson-Ross-Weir, NRW)反演方法可以计算得到折射率 n 和特性阻抗 Z , 其公式为^[12]

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (6)$$

$$n = \frac{1}{k_0 d} \{ \text{Im}[\ln(X \pm i \sqrt{1-X^2})] + 2m\pi - i \text{Re}[\ln(x \pm i \sqrt{1-X^2})] \} \quad (7)$$

式中 k_0 为波数, d 为 S 结构单元的电长度, 整数 m 代表选择折射率 n 实部的支路.

$$C = \frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2S_{21}} \quad (8)$$

式中要满足 Z 的实部和 n 的虚部同时大于或等于 0.

2 S 型左手单元的仿真结果与分析

通过运用 HFSS 软件对 S 结构单元进行仿真和优化,可以得到其 S 参量曲线,如图 4.

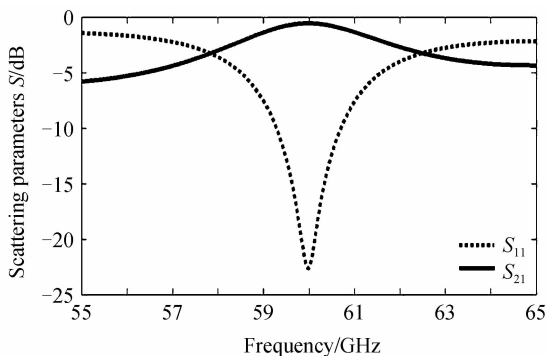


图 4 S 参量幅度值随频率的变化曲线

Fig. 4 Magnitude of S parameters vs. frequency

由图 4 可以看出,在 60 GHz 左右的频段内, S_{11} , S_{21} 较为理想. 在 58~62 GHz 频带上, S_{21} 的幅度大于 -3 dB, 说明该频带内的电磁波在这 S 型左手结构单元内传输时损耗比较小. 结构单元如果具有左手频段内, 那么该频段内其介电常量和磁导率则同时为负, 并且具有负折射率. 同时还可以在仿真当中发现, 在 S 结构单元中的基板介电常量起着很大的影响作用, 当基板介电常量减小时, 左手频段向高频移动^[13]. 因此本设计采用介电常量为 2.2, 运用 NRW 方法提取可以获得 ϵ 与 μ 曲线如图 5, 同时可以得到其折射率 n 曲线如图 6 所示.

根据图 5 和图 6 可以看出在 58.1~61.4 GHz 内具有 3.3 GHz 宽的左手频带, 同时可以计算出相对带宽约为 5.5%. 60 GHz 通信是当前通信领域的一个研究热点, 而本设计中的左手频段正好符合其要求. 将本设计中的 S 左手结构运用于 60 GHz

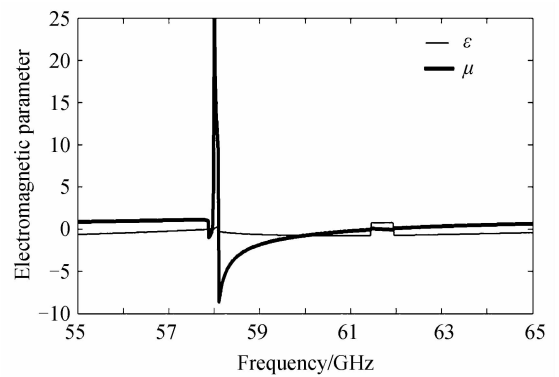


图 5 ϵ 和 μ 频率的变化曲线

Fig. 5 ϵ and μ index vs. frequency

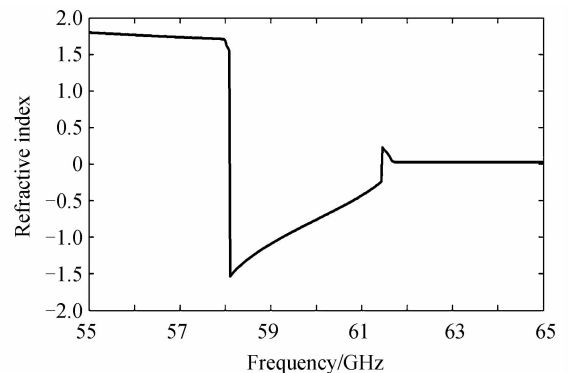


图 6 有效折射率随频率的变化曲线

Fig. 6 Effective refraction index vs. frequency

中, 将会增大频带宽度、降低损耗、减小单元尺寸等一系列的优于传统右手材料特点.

3 结论

与 Smith 型结构左手材料相比, 弯曲的 S 型金属结构无需增加额外的金属棒而且具有比金属棒更大的电感值, 并且 S 型结构简单, 在设计时可以在理论分析的基础上合理地改变相应的尺寸来获得需要的左手频带, 这与其他结构相比实现起来比较容易. 此外, 基板的介电常量和厚度也影响着左手特性和结构的性能, 通过综合方面的考虑和仿真, 文中 S 型结构选择的基板厚度为 0.1 mm, 其介电常量为 2.2. 本设计针对 60 GHz 通信, 设计出在 60 GHz 左右的频带内介电常量和磁导率同时为负的一个带宽达到 3.3 GHz 的左手结构. 文中的 S 型结构左手结构具有一定的理论意义和实验价值.

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): 509-514.
- [2] CHEN H, RAN L, HUANGFU J, et al. Metamaterial exhibiting left-handed properties over multiple frequency bands [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, **96**(9): 5338-5340.
- [3] YEN T J, PADILLA W J, FANG N, et al. Terahertz magnetic response from artificial materials[J]. *Science*, 2004, **20**(303): 1494-1496.

- [4] WANG Jing, YANG Xu, MO Ting-ting, *et al.* Status and development of 60 GHz wireless communications [J]. *Information Technology*, 2008, **5**(3): 1009-2552.
王静, 杨旭, 莫亭亭, 等. 60 GHz 无线通信研究现状和发展趋势[J]. 信息技术, 2008, **5**(3): 1009-2552.
- [5] SERVOCE R F. Next wave of metamaterials hopes to fuel the revolution[J]. *Science*, 2010, **327**(5962): 138-139.
- [6] CHEN H, RAN L, HUANGFU J, *et al.* Metamaterials exhibiting left-handed properties over multiple frequency bands [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **96**(9): 5338-5340.
- [7] PENDY J B, HOBBS 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.
- [8] GRZEGORCZYK Y M, MOSS C D, LU J, *et al.* Properties of left-handed metamaterials; transmission, backward phase, negative refraction, and focusing[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, **53**(9): 2956-2967.
- [9] CHEN H, RAN L, HUANGFU J. Magnetical exhibiting left-handed properties over multiple frequency bands[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, **96**(9): 5338-5340.
- [10] CHEN H, RAN L, HUANGFU J, *et al.* Equivalent circuit model for left-handed metamaterials[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, **100**(6): 24915-24921.
- [11] SAUVIAC B, SIMOVSKI C R, TRETAKOV S A. Double split-ring resonators; Analytical modeling and numerical simulations[J]. *Electromagnetics*, 2004, **24**(5): 17-338.
- [12] KOSCHNY T, KAFESAKI M, ECONOMOUS E N. Effective medium theory of left-handed materials [J]. *Physical Review Letters*, 2004, **86**(68): 587-698.
- [13] 崔万照, 马伟, 邱乐德, 等. 电磁超介质及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

• 下期预告 •

金属化生物颗粒的制备与性能测试

孙杜娟, 胡以华, 顾有林, 王勇, 李乐

(脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院); 电子制约技术安徽省重点实验室, 合肥 230037)

摘要: 针对当前军、民用领域对新型包覆型功能材料的需求, 以花粉作为内核, 采用化学镀铜方法, 制备了表面包覆铜膜的金属化花粉, 利用扫描电子显微镜、傅里叶变换红外光谱仪和微波测试系统对金属化花粉的结构特性、红外与微波波段电磁特性进行了测试与分析。扫描电子显微镜图显示, 花粉金属化后形态保持良好、未发生破裂或变形, 铜镀层厚度均匀、结构致密, 镀层厚度在 $1\ \mu\text{m}$ 左右。红外和微波波段实验结果表明, 金属化花粉的红外与微波波段电磁特性主要与其铜镀层决定, 镀铜后花粉对红外和微波具有强反射和强吸收作用。金属化花粉颗粒以其金属外壳的强电磁衰减能力和花粉内核的低密度轻质特性, 具有作为新型红外和微波波段功能材料的潜力。

关键词: 电磁特性; 生物加工; 花粉金属化; 化学镀铜