

具有独立电磁响应的三角形人工电磁媒质

朱诚, 梁昌洪, 李龙, 党晓杰, 苏子剑, 陈曦

(西安电子科技大学天线与微波技术国防重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 提出了一种同时具有电磁模式响应的人工电磁媒质的综合构成(SC)方法. 在介质基板上单面刻蚀的三角形金属开口对环只具有磁响应, 即只具有负的磁导率, 在介质基板上单面刻蚀的金属线阵列只具有电响应, 即只具有负的介电常数, SC方法通过将金属线设计在开口环的中部, 将以上两种结构连接起来, 从而构成同时具有电磁响应的三角形电磁谐振(TER)单元结构, 并通过将TER排成阵列构成新型人工电磁媒质. 理论仿真与实验测量结果表明, 与传统的金属环加线结构相比, TER单元具有电响应与磁响应的双阻带特性, 并且由其构成的双负媒质的左手传输通带带宽比环加线结构的带宽扩展了217%.

关键词: 三角形电磁谐振单元; 电模式响应; 磁模式响应; 双负媒质

中图分类号: TM15 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)02-0087-05

Triangular Metamaterials with Distinct Electric and Magnetic Responses

ZHU Cheng, LIANG Changhong, LI Long, DANG Xiaojie, SU Zijian, CHEN Xi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Antennas and Microwaves, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A synthesis constitution (SC) method of metamaterials which have an electric response and a magnetic response is proposed. The metallic triangular open loop resonators etched on the dielectric board have the magnetic response, i. e., the negative permeability; and the metallic wire arrays etched on the dielectric board have the electric response, i. e., the negative permittivity. Through locating the wire in the middle part of the loop and combining the two structures mentioned above, the SC method constitutes the triangular electromagnetic resonator (TER) which simultaneously has the magnetic and the electric responses and composes the novel metamaterials in the TER array form. Both theoretical simulation and experiment measurement prove that compared with the conventional split ring resonator (SRR) and wire structure, TER have the dual stopbands property which corresponds to the electric and magnetic responses. Moreover, the left-handed passband of the double negative metamaterial composed of TER-wire is 217% wider than that of the conventional SRR-wire design.

Keywords: triangular electromagnetic resonator; electric response; magnetic response; double negative metamaterial

双负媒质和人工电磁介质由于其独特的电磁特性, 已越来越受到人们的关注^[1-3]. 通常自然界中存在的媒质的介电常数和磁导率都为正值, 而异向介

质的介电常数和磁导率则明显区别于自然界中存在的媒质, 它具体包括双负媒质(该媒质的介电常数和磁导率都为负值)、单负媒质(介电常数或磁导率二

收稿日期: 2010-06-10. 作者简介: 朱诚(1984—), 男, 博士生; 梁昌洪(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60801040, 60601028); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NECT-90-0631); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(74104952).

网络出版时间: 2010-12-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20101225.1137.001.html>

者中只有一个为负值)、双各向异性媒质等. 随着对双负媒质特性研究的不断深入, 出现了很多种构成双负媒质的方法.

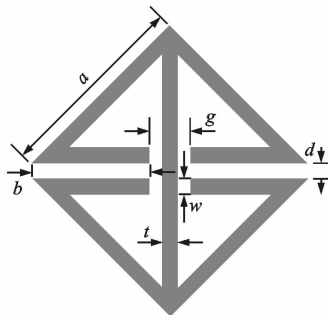
目前, 常规实现双负媒质的结构主要有金属开口谐振环加线结构^[4]和金属开口谐振环加电场耦合谐振环结构(ELC)^[5-6]2种. 由于构成双负媒质的单元结构尺寸相对于电磁波波长的尺寸来说很小, 因此由这些单元结构周期性排列所组成的结构就可以等效为一种电磁媒质(或电磁材料), 即双负媒质(或双负材料). 其中, 环加线结构的设计相对简单, 因为金属线阵列的宽带电响应特性很容易覆盖掉环的窄带磁响应特性. ELC作为一种备选的具有电响应特性的异向介质, 可以替代导线得到负的介电常数, 并且当它与具有磁响应特性的环结构结合时也能够构成双负媒质. 然而, 上述2种方法都存在着结构特性单一的问题, 即金属环只具有磁响应特性, 而金属线阵和 ELC 只具有电响应特性, 并且由它们构成的双负媒质具有较窄的双负频段.

针对以上问题, 本文提出了一种新的三角形电磁谐振单元(triangular electromagnetic resonator, TER)人工电磁媒质, 并提出了一种比较简便的综合构成(SC)方法来构造该单元. 该方法通过将金属线设计在金属环的中央, 并将二者连接起来, 从而构成同时具有独立电磁响应的 TER. TER 在不同频段具有负的介电常数和负的磁导率, 本文分别称其为电模式和磁模式响应. TER 既可与具有磁响应特性的环组合, 也可与具有电响应特性的线组合来构成双负媒质. 更重要的是, 利用 TER 的磁响应与金属线组合可以得到较宽双负频段的双负媒质.

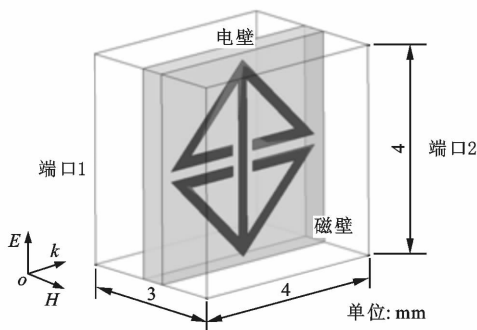
1 结构及参数提取

TER 由上下2个水平的等腰直角三角形开口环及位于两环中间的金属线组成, 开口位于该三角形斜边中央, 其各个结构参数分别为: 等腰直角三角形直角边边长 $a=2.5$ mm, 斜边开口左、右边线长 $b=1.52$ mm, 两三角环间距 $d=0.2$ mm, 开口宽度 $g=0.5$ mm, 中间金属线宽度 $t=0.2$ mm, 三角形线宽 $w=0.2$ mm, TER 单元模型如图 1a 所示. 图 1b 给出了 TER 的单元仿真设置示意图, 其中包括极化电磁波的电场、磁场和传输方向. TER 位于矩形空气腔的中央位置, 单元间距为 4 mm, 层间距为 3 mm, 空气腔沿电场方向的上下表面设置为电壁, 沿磁场方向的前、后2个面设置为磁壁, 沿波数方向的左右2个面设置为端口. 本文选用的介质板型号为

FR4(厚度为 0.5 mm, 介电常数 $\epsilon=4.4$ F/m, 损耗角正切 $\tan\delta=0.02$). 本文用全波电磁仿真软件 Ansoft HFSS 对 TER 单元结构进行了仿真, 得到了其电磁能量散射参数(S 参数), 进而通过标准参数提取方法^[7], 将 S 参数转化为 4 个媒质本构参数. 由于该方法已考虑了空间色散, 故 TER 的本构参数可以清楚地反映出其单元特性.



(a) TER 的单元模型



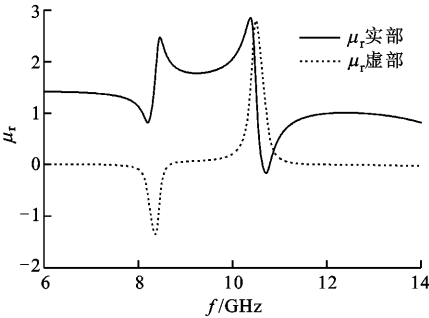
(b) TER 单元仿真设置示意图

图1 TER 单元模型及仿真设置示意图

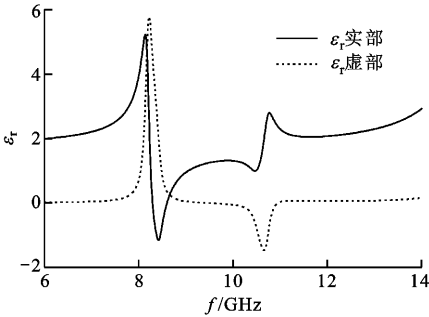
图 2 给出了通过参数提取法得到的 TER 的相对磁导率 μ_r 、相对介电常数 ϵ_r 、相对折射率 n 和归一化阻抗 Z 的色散曲线. 可以看到, 在 8.4 GHz 附近, 相对介电常数有一个很强的谐振, 其实部从 5.2 变化到 -1.15. 这表明第一个谐振由电模式产生. 同时, 相对磁导率在 8.4 GHz 附近产生一个反谐振, 它由结构的固有有限周期的边缘折射率产生^[8]. 在 10.7 GHz 附近, 相对磁导率有一个明显的谐振, 其值由 2.8 变化到 -0.2, 同样相对介电常数在该频点上出现一个反谐振.

2 电模式响应和磁模式响应

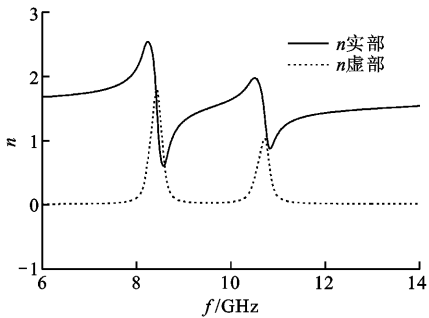
图 3 给出分别给出了电模式响应和磁模式响应的表面电流分布, 箭头代表表面电流的流向, 电流箭头线越粗代表电流强度越大, 越细代表电流强度越小.



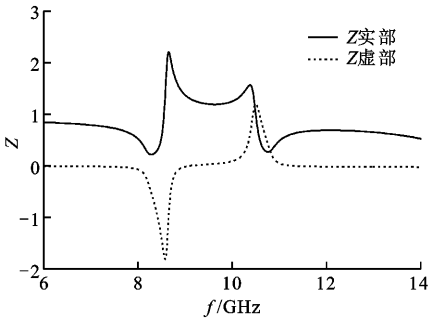
(a)相对磁导率曲线



(b)相对介电常数曲线



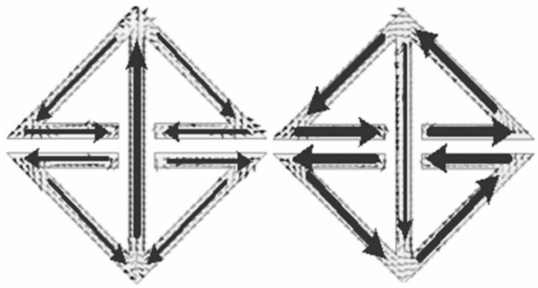
(c)等效折射率曲线



(d)等效归一化阻抗曲线

图 2 TER 的 4 个媒质本构参数的色散曲线

在 8.4 GHz 的电模式响应处,其表面电流主要分布在 TER 的中心金属线上,而且环上电流无法形成回路,这表明该结构像金属线阵一样具有可以耦合



(a)8.4 GHz 时电响应 (b)10.8 GHz 时磁响应

图 3 在电响应和磁响应频率处的表面电流分布

到外部电场的电模式,并产生负介电常数.此外,在 10.8 GHz 的磁响应处,表面电流主要分布在 TER 的 2 个环上,并且能够形成回路,同时这 2 个回路电流所形成的磁偶极矩方向相同,这说明 TER 与外部磁场发生磁耦合,从而产生磁模式,并具有负磁导率.

从上面的分析可以看出,环中心金属线的宽度对电模式响应的影响较大,TER 两环的间距对磁模式响应的影响也较大.这是因为在电响应时,感应电流主要位于中心线上,而在磁响应时,中心线上基本没有电流分布.图 4 给出了传输特性随中心金属线宽 t 和两环间距 d 的变化情况.和预期的一样,随着中心线宽 t 的增加,磁响应频率基本不变,而电响应频率向高频移动.此外,随着环间距 d 的增加,电响应频率基本不变,而磁响应频率向高频移动,这也很好地验证了图 3 所示的表面电流分布.

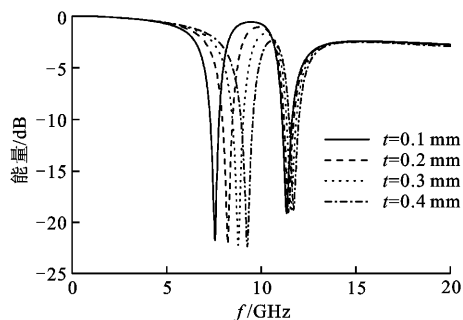
3 平板波导系统测量 TER 传输特性

本文设计了一个平板波导系统来测量 TER 的传输特性.该系统中的 2 个探针分别在平板波导两侧作为发射和接收端口,待测样品由 6 个 TER 单元构成,位于 2 个探针之间的平板波导中心位置.由于电场能量以线极化电磁波的形式被限定在波导的 2 个平板之间,并且电场和磁场方向都与仿真设置相同,因此可以采用标准的自由空间提取程序^[7].从图 5 给出的 6 单元 TER 的传输特性的测量值可以看到,存在 2 个传输极小值点位于 8.4 GHz 和 10.8 GHz 处,它们分别对应于图 2 给出的电模式响应和磁模式响应的 2 个频率.

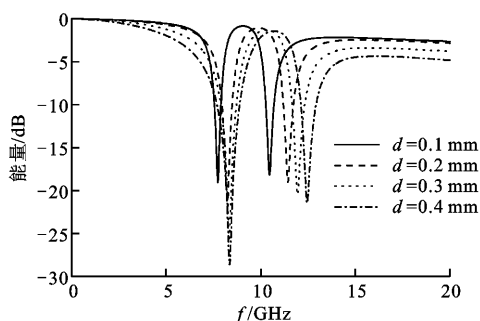
4 由 TER 加线构成的双负媒质特性

鉴于 Schurig 等人^[5]已对与 TER 结构类似的 ELC 结构的电特性做了深入的研究,本文主要考虑

TER 的磁特性. 在 TER 所在介质板的另一面加上长度为 4 mm、宽度为 0.5 mm 的金属线, 这种 TER 加线结构可以构成双负媒质. 图6给出了TER

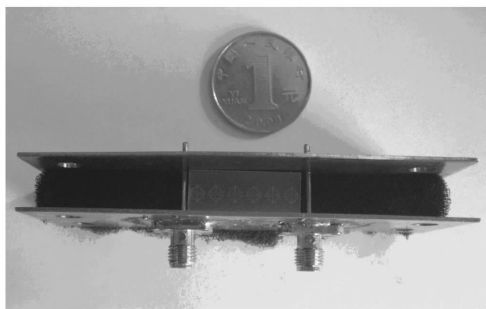


(a) 能量随中心金属线宽的变化

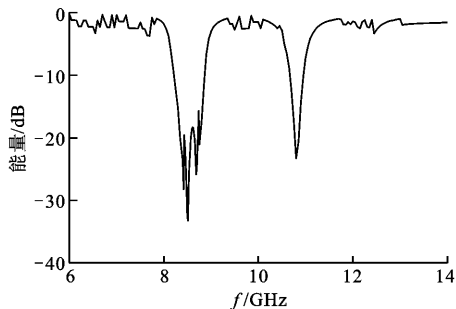


(b) 能量随两环间距的变化

图4 TER 能量传输特性随中心金属线宽和两环间距的变化曲线

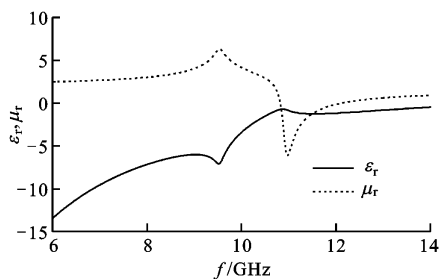


(a) 6 单元 TER 置于平板波导的实物照片

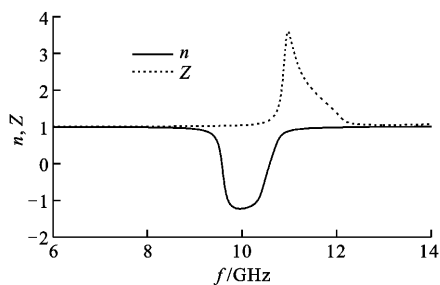


(b) 6 单元 TER 的能量传输曲线

图5 6 单元 TER 测量装置照片及能量传输曲线



(a) 相对介电常数和相对磁导率



(b) 等效折射率和归一化阻抗

图6 TER 加线构成的双负媒质的提取参数结果

加线结构的 4 个等效媒质参数, 直接证明了 TER 的磁模式响应. 由参数提取的结果可以看到, TER 确实具有磁响应, 并且由 TER 加线结构构成的左手媒质比传统的环加线 (SRR-wire) 结构的传输能带宽扩展了 217%^[9].

此外, 通过测量传输方向上不同单元数的相移, 可以实验验证由 TER 加线构成双负媒质的负的相速度. 本文采用矢量网络分析仪 8719ES 来测量 TER 加线结构的传输幅度和相位. 图 7 给出了在传输方向上分别有 2、4、6 个单元的传输相位曲线, 其频率范围为 9.0~11.0 GHz, 该频段的确落在了图 6 给出的负折射率频段内.

正常来说, 如果材料的折射率为正, 那么随着单元数的增加, 其传输相位也应该增加, 但从图 7 可以看到, 随着 TER 加线结构单元数的增加, 电磁波的

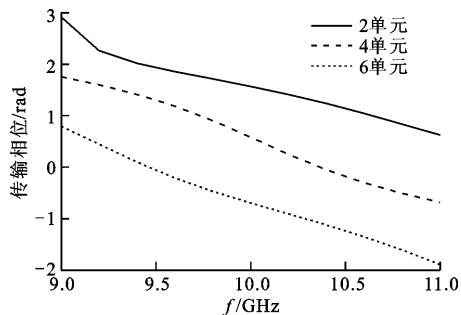


图7 具有 2、4、6 个单元的 TER 加线结构在双负频段的传输相位

传输相位在逐渐减小. 本文用实验得出的相移数据来计算 TER 加线结构的折射率. 由波长 λ 、相移 $\Delta\varphi$ 和 TER 加线结构的单位长度 ΔL 所表示的折射率由下式给出

$$n = \frac{\Delta\varphi}{\Delta L} \frac{\lambda}{2\pi} \quad (1)$$

在 $f = 9.96$ GHz 处, 电磁波的波长 $\lambda = 3.01$ cm, 由实验结果得出的每个单元 ($\Delta L = 6$ mm) 的平均相移 $\Delta\varphi = -0.91\pi$. 将这些数据代入式(1)中, 可以得到在 9.96 GHz 时的折射率为 -2.28 , 这个结果与用参数提取法得出的 $n = -2.23$ 的结果吻合良好.

5 结 论

本文提出了一种新型综合构成方法, 用来构造同时具有电磁响应特性的 TER 单元结构. 该方法通过将金属线设计在开口对环的中部, 并将二者连接起来, 从而构成 TER 单元结构. 理论仿真与实验测量结果表明, TER 单元结构在低频的电模式相应处具有负介电常数, 同时在高频的磁模式响应处具有负磁导率. 此外, 由 TER 加线结构构成的双负媒质的双负频带宽度较传统的环线结构带宽展宽了 217%.

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] AYDIN K, OZBAY E. Left-handed metamaterial based superlens for subwavelength imaging of electromagnetic waves [J]. Applied Physics: A, 2007, 87(2): 137-141.
- [3] LUBKOWSKI G, BANDLOW B, SCHUHMANN R, et al. Effective modeling of double negative metamaterial macrostructures [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology, 2009, 57(5): 1136-1146.
- [4] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. Science, 2001, 292(5514): 77-79.
- [5] SCHURIG D, MOCK J J, SMITH D R. Electric-field-coupled resonators for negative permittivity metamaterials [J/OL]. Applied Physics Letter, 2006, 88(4) [2010-05-01]. <http://link.aip.org/link/?APPLAB/88/041109/1>.
- [6] LIU Ruopeng, DEGRON A., MOCK J J, et al. Negative index material composed of electric and magnetic resonators [J/OL]. Applied Physics Letter, 2007, 90(26) [2010-05-01]. <http://link.aip.org/link/?APPLAB/90/263504/1>.
- [7] SMITH D R, VIER D C, KOSCHNY T, et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials [J/OL]. Physical Review: E, 2005, 71(3) [2010-05-01]. <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.71.036617>.
- [8] KOSCHNY T, MARKOS P, SMITH D R, et al. Resonant and antiresonant frequency dependence of the effective parameters of metamaterials [J/OL]. Physical Review: E, 2003, 68(6) [2010-05-01]. <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.68.065602>.
- [9] ZHU Cheng, LI Long, LIANG Changhong. An efficient broadband left-handed metamaterials with low-loss [C/OL]. Proceedings of the 2010 IEEE AP-S/URSI Symposium, 2010 [2010-05-02]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5561821.

[本刊相关文献链接]

- 互感耦合开关磁阻电机的等效磁路模型有限元分析. 西安交通大学学报, 2010, 44(4):71-75.
- 电子设备电磁敏感性仿真分析及优化设计方法. 西安交通大学学报, 2010, 44(8):5-9.
- 继电保护装置信号端口电磁干扰传播通道的建模与仿真. 西安交通大学学报, 2009, 43(10):104-108.
- 用于多导体传输参数提取的等效电流密度法. 西安交通大学学报, 2008, 42(12):1521-1525.
- 一种降低交替方向隐式时域有限差分数值色散的方法. 西安交通大学学报, 2008, 42(2):209-212.
- 求解三维准静态矢量磁位的快速多极方法. 西安交通大学学报, 2007, 41(4):489-492.
- 信号完整性分析中时域宏模型结合电路仿真的方法研究. 西安交通大学学报, 2007, 41(6):631-635.
- 波导与开口腔体瞬态特性研究. 西安交通大学学报, 2007, 41(10):1179-1183.
- 一种电子设备电磁敏感性的仿真建模与优化设计方法. 西安交通大学学报, 2008, 42(6):688-692.
- 直线及 L 型 GIS 模型电磁波传播特性研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(10):1280-1284.
- 气体绝缘开关直线和 T 型结构中电磁波传播特性的仿真. 西安交通大学学报, 2008, 42(12):1526-1530.

(编辑 刘杨)