

# 基于同向开口双环的双通带左手材料研究

李洪岩<sup>1,2</sup>, 郝明明<sup>2</sup>, 黄志祥<sup>2</sup>

(1. 安徽交通职业技术学院 土木工程系, 安徽 合肥 230051;  
2. 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 230039)

**摘要:**为了改进传统的开口谐振环-导线(SRRs-wire)结构电磁特性,利用不同大小的开口谐振环所产生不同负磁谐振频率点的特点,设计了同向开口双环的SRRs-wire结构,并给出了其等效电磁参数反演结果。通过增加其单元结构的金属短线的个数实现了双通带左手特性;同时通过改变外环为U型环降低了内外环的相互耦合。利用内外谐振环间具有弱耦合的特性,提高了高频左手通带的带宽,同时可以较方便地调节双通带工作频率点,具有很好的可调性。

**关键词:**左手材料;双通带;弱耦合;HFSS 仿真

**中图分类号:** TN81

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2014)05-0219-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.05.054

## Research on Dual-band Left-handed Material Based on Double Open Ring with Same Direction

LI Hong-yan<sup>1,2</sup>, HAO Ming-ming<sup>2</sup>, HUANG Zhi-xiang<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Anhui Communications Vocational and Technical College, Hefei 230051, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Computing and Signal Processing of Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230039, China)

**Abstract:** In order to improve the magnetic performance of traditional SRRs-wire, by taking advantage of the characteristic with different sized split ring generated different negative magnetic resonance frequency, designed a new SRRs-wire structure with two different sizes but the same direction double split ring resonators. The retrieved parameters for the structure are also presented. By increasing the number of the metal wire in the unit structure obtained the dual-band left-handed materials, meanwhile by changing the outer ring to U-shape ring reduce the mutual coupling of the inner and outer ring to improve bandwidth of the high-frequency portion and make sure the structure has a good tunability.

**Key words:** left-handed materials; dual-band; weak mutual coupling; HFSS simulation

## 0 引言

左手材料是一种介电常数 $\epsilon$ 和磁导率 $\mu$ 均为负值的人工电磁超材料,该名称最早由 V. G. Veselago 提出<sup>[1]</sup>。左手材料具有一些与自然界普通材料不同的电磁特性,利用这些特性,能够实现平板聚焦、超薄谐振腔体、完美透镜、后向波天线等功能,具有广泛的应用前景和价值。2001年 Smith 等人首次利用周期开口谐振环和金属线阵列实现了微波段的左手材料,在此之后大量基于 Smith 型的左手材料被提出。目前已有学

者提出 $\Omega$ 型、S型和H型等一些左手材料结构,它们虽然在带宽、电磁性能等方面有了较大的改善,但是这些结构仅仅只有单通频带<sup>[2-5]</sup>。目前,关于多通频带的报道较少<sup>[6-10]</sup>,多通带左手材料可以应用在很多领域,如多通带滤波器、波分复用器、耦合器等,因此在多个频段内具有异向特性的左手材料也是研究的重点之一。在微波频段内通过改进传统 Smith 型左手材料的开口谐振环结构,同时保留金属短线来实现双通带左手特性具有原理简单、结构简单、易于可调等优点。文

收稿日期:2013-06-30

修回日期:2013-10-13

网络出版时间:2014-01-28

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(60931002,61101064);安徽省杰出青年基金(1108085J01);安徽省自然科学基金项目(KJ2011A002, KJ2013A037)

**作者简介:**李洪岩(1980-),男,硕士生,研究方向为无线通信与电磁兼容;黄志祥,教授,博导,研究方向为计算电磁学、散射与逆散射、雷达成像。

**网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140128.1140.022.html>

献[7]设计的双通带左手材料虽然可以实现双通带的效果,但其左手通带可调范围较小,且其占用的二维空间较大。文献[10]中由于内外环之间的耦合较大,产生的多通带左手材料频段不好控制,可调性差且其负折射率频段带宽很窄。

文中利用不同形状的开口谐振环对其磁谐振频点影响较大的特点,通过降低内外环之间的相互耦合,设计了具有较好可调性的同向开口双环的左手材料。等效电磁参数反演结果表明结构具有较宽的负折射率带宽。

## 1 同向方形开口双环左手材料

### 1.1 结构模型设计

通过文献[11]可知谐振单环左手材料与传统 Smith 型左手材料相比,也可以产生具有较宽带宽的左手特性。通过验证得到改变单环的边长对于其磁谐振频率的影响较大,于是基于此原理设计了一种同向开口双环结构的左手材料,其结构如图 1 所示。

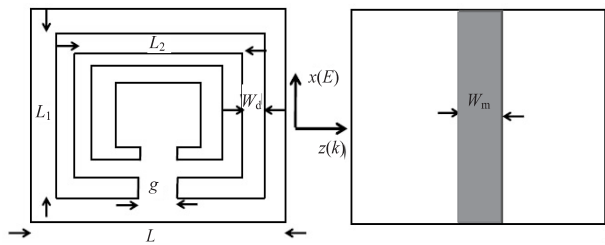


图 1 开口谐振双环左手材料

( $L = 10 \text{ mm}$ ,  $L_1 = 8 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 6 \text{ mm}$ ,  $g = 0.25 \text{ mm}$ ,  
 $W_m = 0.8 \text{ mm}$ ,  $W_d = 0.2 \text{ mm}$ )

其中金属铜线的电导率  $\sigma_m = 5.88 \times 10^7 \text{ s/m}$ , 厚度  $d = 0.035 \text{ mm}$ , 介质材料为 FR4, 相对介电常数 4.4, 介质损耗为 0.02, 厚度为  $d_s = 0.6 \text{ mm}$ 。采用商业三维电磁仿真软件 HFSS 对该结构进行 S 参数仿真得到对应的反射系数  $S_{11}$  和透射系数  $S_{21}$ 。为了模拟无限大的周期结构, 把与电磁垂直的两个边界设置为理想电边界 (PEC), 与磁场垂直的两个边界设置为理想磁边界 (PMC)。

### 1.2 等效电磁反演

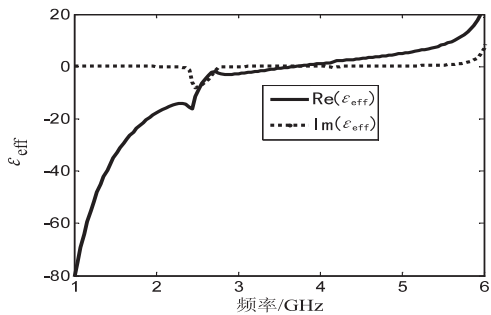
可以利用垂直入射情况下 S 参数提取方法<sup>[12-13]</sup>来得到等效电磁参数, 其具体公式如下:

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

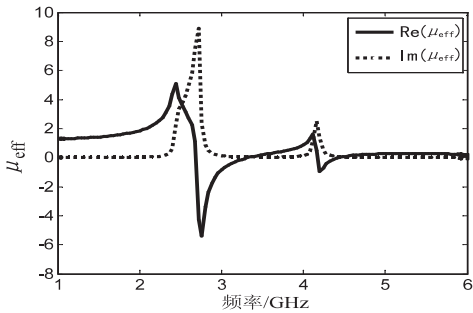
$$Z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (2)$$

图 2 为利用 S 参数反演得到的等效电磁参数示意图, 可知其中高频磁谐振点的带宽较小。从折射率  $n$  可以看出此时在高频负磁谐振频率点附近没有出现负

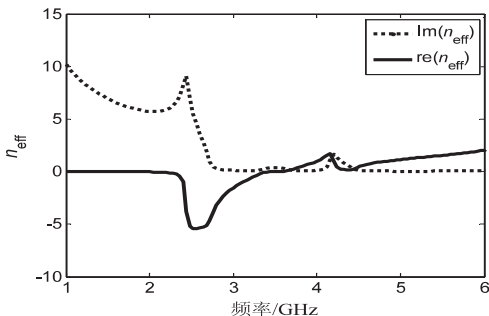
折射现象。



(a) 介电常数



(b) 磁导率



(c) 折射率

图 2 等效电磁参数曲线图

通过电磁仿真软件 HFSS 得到了结构在磁谐振点处的电流分布。结果反映电流在低频磁谐振频率点由外环结构所产生, 高频谐振点由内环结构所产生。低频磁谐振点  $f_1 = 2.7 \text{ GHz}$  时内环和外环的耦合较小, 低频磁谐振点比较明显。高频磁谐振点  $f_2 = 4.2 \text{ GHz}$  时外环电流较大, 此时由于内环和外环的耦合较大导致了第二个磁谐振点的带宽和幅值较小。

## 2 同向 U 形和方形双环左手材料

通过同向方形开口环左手材料实现了左手特性, 从等效电磁反演结果来看, 一方面由于高频磁谐振频率点处外环存在较多电流分布, 使得内外环发生了较大的耦合, 这对高频磁谐振频率点造成较大影响, 同时这也不利于高频左手通带的调节; 另一方面由于负介电常数的频率范围没有实现对第二个负磁谐振频率点的覆盖, 从而没有实现结构的负折射率特性。为了实现双通带的左手材料, 对第一节开口谐振双环左手材料进行了两点改进。

2.1 结构单元模型

通过改变开口谐振双环产生磁谐振方式,由外环产生出较高的磁谐振频率,内环产生出较低磁谐振频率的方式来降低在高频磁谐振时内外环之间的耦合。金属线阵列实现负的介电常数已经有学者做过详细分析<sup>[14]</sup>,通过增加结构单位的金属短线个数来增加等离子频率的大小,实现负介电常数频段向高频偏移。本节提出了同向 U 形和方形双环左手材料模型如图 3 所示,该结构中产生磁谐振的开口环由同向的 U 形环和方形环所组成。其中金属线采用铜线,介质板参数和图 1 保持一致。模型结构和参数分别如图 3 所示。

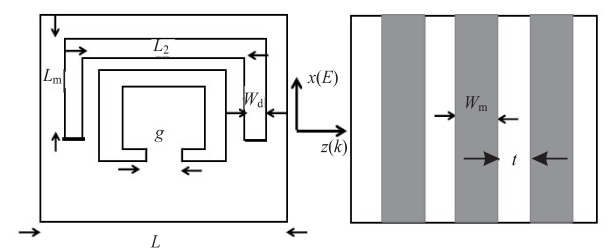


图 3 U 型和方形双环结构

( $L_1 = 8.5\text{ mm}$ ,  $L_2 = 7\text{ mm}$ ,  $g = 0.25\text{ mm}$ ,  $L_m = 7\text{ mm}$ ,  $L = 10\text{ mm}$ ,  $t = 1\text{ mm}$ ,  $W_m = 0.8\text{ mm}$ )

2.2 电磁参数反演

电磁参数反演如图 4 所示,结构在 2.5 GHz ~ 3.4 GHz 和 4.25 GHz ~ 5 GHz 具有负的折射率,与传统的左手材料相比具有较宽的负折射带宽。实际情况中单负超材料在某些情况下也可以产生负的折射率。在这我们给出等效介电常数和等效磁导率的曲线。图 4 (b) 和 (c) 分别得出结构在 3.16 GHz ~ 3.38 GHz 和 4.38 GHz ~ 4.94 GHz 具有负的磁导率,在 1.00 GHz ~ 5.48 GHz 具有负的介电常数。因此该结构在 3.16 GHz ~ 3.40 GHz 和 4.38 GHz ~ 4.94 GHz 为双负频段。

为了进一步了解其左手特性,分析了其磁谐振点处的电流分布情况。低频磁谐振频率  $f_1 = 3.2\text{ GHz}$  处电流是由内环产生,且与外环耦合较小。高频谐振频率  $f_2 = 4.6\text{ GHz}$  处的电流是由外环 U 形开口谐振环产生,此时内环具有较少的电流分布,内外环之间的相互耦合已经得到明显的改善。

3 结构参数对左手通带的影响

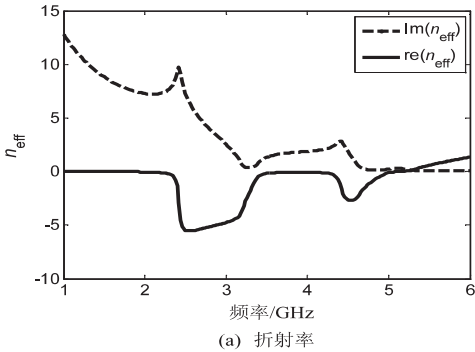
该结构具有很好的调节性,可以通过调整结构参数来获得所需频段内的左手材料,由于内外环的耦合较小,可以将内外环分别等效为单环的 LC 电路<sup>[15]</sup>。

由文献[5,11]可知其等效电感为

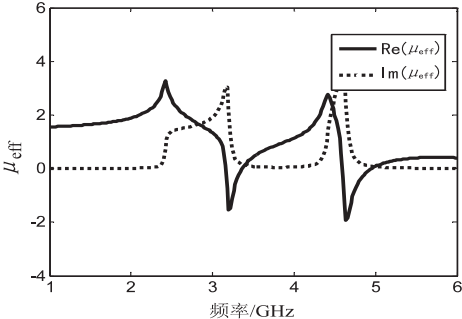
$$L \propto \ln\left(\frac{L}{w_d + h}\right) \tag{3}$$

其等效电容为:

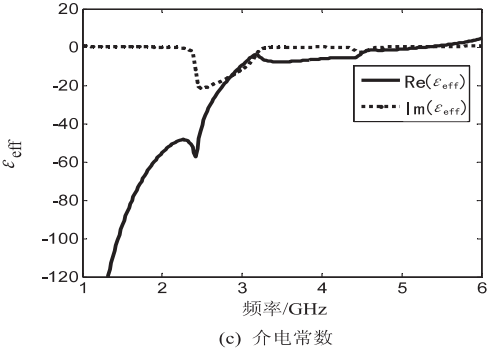
$$C \propto \varepsilon_0 \varepsilon_r \left(\frac{w_d^2}{g}\right) \tag{4}$$



(a) 折射率



(b) 磁导率



(c) 介电常数

图 4 等效电磁参数曲线图

等效 LC 电路的磁谐振频率可以表示为:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \propto \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \ln\left(\frac{L}{w_d + h}\right) \left(\frac{w_d^2}{g}\right)}} \tag{5}$$

其中, $L$ 为金属环的长度; $h$ 为金属铜的厚度; $w_d$ 和  $g$  分别表示金属环的宽度和开口宽度。

3.1 外环臂长对左手通带的影响

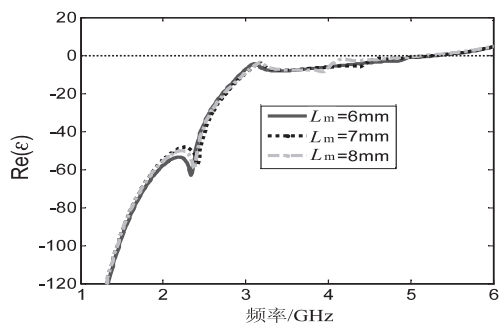
图 5 给出了在固定内环边长  $L_2 = 7\text{ mm}$ ,改变 U 形环臂长的电磁参数示意图,由于内环固定,内外环耦合较小且内外环之间的电容变化较小,所以低频处左手通带较稳定。由公式(5)可知高频谐振点的谐振频率与 U 形环臂长成反比,随着  $L_m$  的减小而向高频方向发生偏移。这和电磁参数反演结果是吻合的。

3.2 内环边长对左手通带的影响

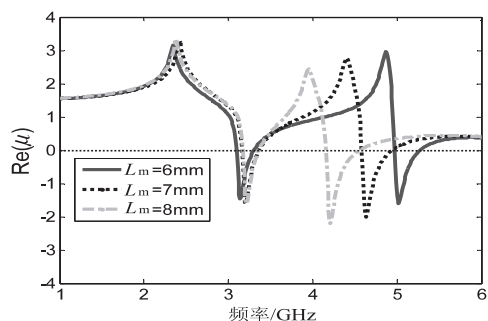
下面改变内环的边长大小来调节低频谐振点的频率。随着内环半径的增大由公式(5)可知,低频磁谐振频率向低频方向发生移动。同时由于内环半径的变

小,将会减小内外环之间的环间电容,从而使得高频磁谐振点向高频发生偏移。由于内外相互耦合较小,

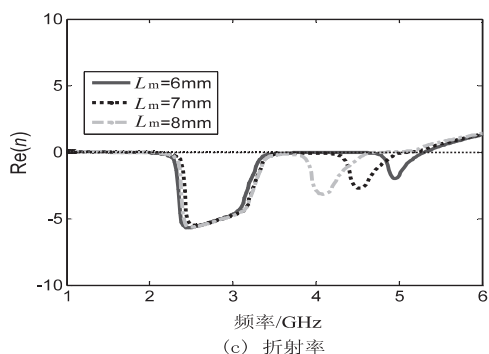
所以高频磁谐振点发生偏移的幅度较小,这与图 6 中参数提取结果也是一致的。



(a) 介电常数



(b) 磁导率



(c) 折射率

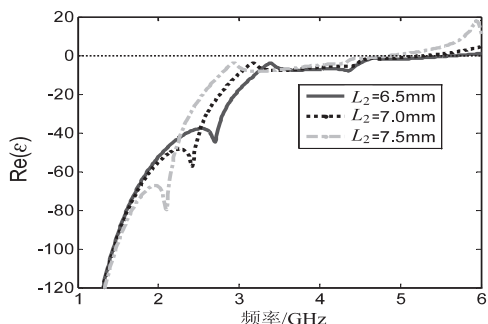
图 5 外环臂长  $L_m$  对左手通带的影响

## 4 结束语

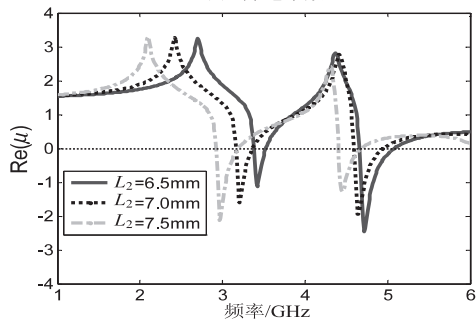
基于传统的开口谐振单环,引入了同向的 U 形单环,通过内环产生低频谐振,外环产生高频谐振的方式降低了内外环之间的相互耦合,同时通过增加周期单元内金属短线的个数来实现负介电常数的频率段覆盖所有的负磁导率频段,从而实现了双通带的左手材料。该结构相对于传统的开口谐振左手材料,具有良好的双通带特性,结构简单,具有较宽的负折射率带宽,而且可以灵活调节双频的位置,这对多通带的左手材料提供了明确的方向和较为具体的研究思路。

### 参考文献:

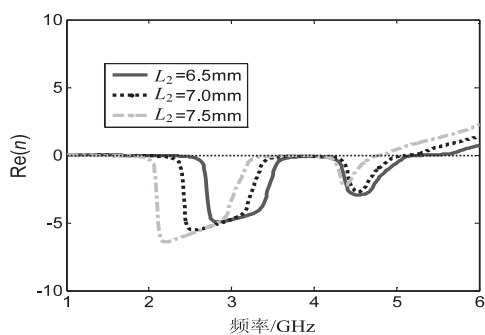
- [1] Vesslago V G. The electrodynamics of substances with simultaneous negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$  [J]. Soviet Physics Usp, 1968, 10: 509-514.
- [2] Huangfu Jiangtao, Ran Lixin, Chen Hongsheng, et al. Experi-



(a) 介电常数



(b) 磁导率



(c) 折射率

图 6 内环边长  $L_2$  对左手通带的影响

mental confirmation of negative refractive index of a metamaterial composed of like metallic patterns [J]. Appl Phys Lett, 2004, 84(9): 1537-1539.

- [3] Chen H, Ran L, Huangpu J, et al. Left-hand material only composed of S-shaped resonator [J]. Physical Review E, 2004, 70: 057605.
- [4] 白冬萍, 张洁婷, 邓 晖. E 型左手材料 [J]. 微波学报, 2012, 28(2): 71-74.
- [5] 陈春晖, 屈绍波, 王甲富, 等. 连通的开口和闭口谐振环构成的磁超材料设计 [J]. 物理学报, 2011(8): 209-215.
- [6] Naghipourfar M. New dual-band DNG metamaterials [J]. Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering, 2011, 2(2): 47-56.
- [7] Sabah C. Member multiband metamaterials based on multiple concentric open-ring resonators topology [J]. Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(1): 8500808.
- [8] Sabah C. Multiband planar metamaterials [J]. Microwave Opt Technol Lett, 2011, 53(10): 2255-2258.



showMessage();//具体显示导航线路提示。

通过上述思想设计的 route 表来找出最短路径,通过存储过程返回路径详细信息,并反映在页面端。实现效果图如图 6 所示。



图 6 导航实现效果

## 4 结束语

通过对图 1 和图 3 的对比可以得出,在小区域内利用覆盖类实现了校园区域信息的具体化,通过对图 1 和图 6 的对比可以得出,通过对百度地图应用程序接口的综合运用,实现了小区域内导航的准确性,方便了师生在校学习生活等。

百度地图提供了强大的电子地图功能,其实现基于浏览器的无刷新访问,方便快捷。百度地图具有强大的用户体验功能,但在具体区域内展现不能满足师生日常学习生活的需求,文中对具体区域内地标的更新和线路导航做出优化,使其能满足自身发展的需求,为其他基于百度地图进行二次开发的开发者提供一定思路。但文中导航的实现基于 PC 端,在以后的工作方向是将其移植到移动端,真正实现其小区域内导航的价值。

## 参考文献:

- [1] 百度在线网络技术(北京)有限公司. 百度地图 JavaScript API v1.4 开发指南[EB/OL]. (2012-11-29) [2013-04-02]. <http://developer.baidu.com/map/>.
- [2] 涂振宇,童星,牛宏伟,等. 基于百度地图 API 实现水库地理信息查询[J]. 江西教育学院学报,2012,33(6):18-20.
- [3] 周彩兰,孙琳,李素芬. AJAX 在电子地图二次开发中的应用[J]. 武汉理工大学学报·信息与管理工程版,2007,29(7):49-52.
- [4] 仇菊香. Google 地图服务支持下的公众地理信息服务系统的设计与实现[D]. 赣州:江西理工大学,2009.
- [5] Bradley D. Adding panoramas to Google maps using Ajax [D]. Columbia:University of British Columbia,2006.
- [6] 殷玥,刘伟,郭东恩. 基于百度地图 API 的房地产展示系统的实现[J]. 软件导刊,2012,11(9):163-164.
- [7] 梁文新,王占中. AJAX+JSP 网站开发从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [8] 月影. JavaScript 王者归来[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [9] 徐卓揆,刘德钦,林宗坚. AJAX 技术在 WebGIS 中的应用[J]. 测绘信息与工程,2007,32(1):3-5.
- [10] 丁毅,彭宏. Google Maps API 在 WebGIS 定位中的应用研究[J]. 杭州电子科技大学学报,2012,32(5):96-99.
- [11] 伏玉琛,周洞汝. Web GIS 的新技术[J]. 计算机工程,2004,30(3):19-21.
- [12] 芦东昕,李典蔚,柳长安. 基于 AJAX 和 Servlet 的 Web GIS 的研究与实现[J]. 计算机技术与发展,2007,17(3):193-195.
- [13] Paulson L D. Building rich web applications with Ajax[J]. Computer,2005,38(10):14-17.
- [14] Smith K. Simplifying Ajax - Style web development[J]. Computer,2006,39(5):98-101.
- [15] Tao Liang, Meng Lingui, Fang Jun, et al. Research and realization of web GIS framework based on XML[C]//Proceedings of the 2008 international workshop on education technology and training & 2008 international workshop on geoscience and remote sensing. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2008:69-72.

(上接第 222 页)

- [9] 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.
- [10] Xu Hexiu, Wang Guangming, Liu Qiang, et al. A metamaterial with multi-band left handed characteristic[J]. Appl Phys A, 2012,107(2):261-268.
- [11] Sabah C. Tunable metamaterial design composed of triangular split ring resonator and wire strip for s- and c- microwave bands[J]. Progress in Electromagnetics Research B, 2012, 22:341-357.
- [12] Smith D R, Schultz S. Determination of effective permittivity

and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients[J]. Phys Rev B, 2002, 65:195104.

- [13] Smith D R, Vier D C, Koschny T. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials[J]. Phys Rev E, 2005, 71(3):6617-6628.
- [14] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures[J]. Phys Rev Lett, 1996, 76(25):4773-4776.
- [15] 唐明春,肖绍球,邓天伟,等. 一种新颖的变开环谐振环双频带磁谐振材料[J]. 物理学报, 2011, 60(6):064101.

基于同向开口双环的双通带左手材料研究


作者:

李洪岩, 郝明明, 黄志祥, [LI Hong-yan](#), [HAO Ming-ming](#), [HUANG Zhi-xiang](#)

作者单位:

[李洪岩, LI Hong-yan \(安徽交通职业技术学院 土木工程系, 安徽 合肥 230051; 安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039\), 郝明明, 黄志祥, HAO Ming-ming, HUANG Zhi-xiang \(安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039\)](#)

刊名:

[计算机技术与发展](#) 

英文刊名:

[Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期):

2014 (5)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjfz201405054.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201405054.aspx)