

一种基于旋转调谐的超材料*

樊京^{1)†} 蔡广宇²⁾

1) (南阳理工学院电子与电气工程系, 南阳 473004)

2) (南阳理工学院机电工程系, 南阳 473004)

(2010 年 1 月 26 日收到; 2010 年 6 月 11 日收到修改稿)

数值仿真研究了一种可调谐的双开口谐振环 (DSRR) 超材料. 在平行入射的电磁波激励下, 这种 DSRR 单元可以在不同的频段分别表现出磁谐振和电谐振. 当外加电场 E 与 DSRR 的双开口平行时, DSRR 受激励得到的磁谐振和电谐振强度最大. 随着 DSRR 超材料沿外加磁场 H 方向顺时针旋转, 其磁谐振和电谐振频率基本保持不变, 但谐振强度均发生显著下降, 同时对应透射相位的突变也逐渐降低. 提出的超材料调谐方法只需要简单地旋转材料, 而不需要改变原有超材料单元的结构或者增加额外的激励场, 极大地简化了可调谐超材料的制备及应用, 在电磁开关、相位调制等方面具有潜在的应用. 同时, 这种简单的方法有望应用于更高频段的超材料调谐, 可以有效地拓展太赫兹频段和光频段超材料的实际应用.

关键词: 超材料, 开口谐振环, 调谐

PACC: 4270Y

1. 引 言

超材料 (metamaterials)^[1-3] 是近几年兴起的一类人工结构材料, 通过设计一定的谐振结构可以对外加电磁场分别产生相应的耦合, 从而获得奇异的电磁特性. 超材料的一个重要特征就是其单元晶格通常远小于对应的谐振波长, 因而超材料可以用有效介电常数 ϵ 和有效磁导率 μ 来描述其电磁特性. 1968 年, Veselago^[1] 从理论上预言了 ϵ 和 μ 同时为负的材料, 并将这种材料定义为左手材料. 2001 年, Shelby 等^[2] 提出了将开口谐振环 (SRR) 阵列和金属杆阵列组合的结构, 制备出左手材料, 并在微波 X 波段第一次从实验上观察到了负折射现象, 引起研究者们对超材料的广泛关注. 目前, 国内外的研究者们提出了许多结构来实现左手材料, 如 S 形结构^[3]、双闭口环^[4,5]、短杆对^[6]、树枝单元^[7,8]、双鱼网结构^[9] 以及三角环结构^[10,11]. 同时, 基于超材料的设计思想, 电磁隐身^[12,13] 和吸波^[14,15] 等技术也得到了飞速发展.

通过设计不同的单元结构, 超材料可以表现出任意的有效介电常数 ϵ 和有效磁导率 μ . 但是一旦

结构确定以后, 超材料的特性通常是不能改变的, 这就极大地限制了超材料的实际应用. 因此, 研究者们越来越关注于谐振特性可调谐的超材料的研究. Shadrivov 等^[16] 在 SRR 结构中加载不同的电容, 可以有效地调节其磁谐振频率. Degiron 等^[17] 在 SRR 的开口处掺杂半导体, 可以通过光照控制半导体的电导率, 从而调节超材料的谐振强度. Zhao 等^[18] 设计了基于液晶的超材料, 可以通过外加恒定电场来调节超材料的谐振频率. Kang 等^[19] 设计了基于铁磁体的超材料, 可以通过外加恒定磁场调节其谐振频率. 上述方法都可以很好地调节超材料的谐振频率或谐振强度, 但是为了实现可调谐的特性, 必须引入其他材料, 并且需要复杂的调谐装置, 从而在一定程度上增加了超材料结构设计的复杂性, 使得这种调谐方法很难应用到更高的频率 (如太赫兹和光频段). 因此, 设计一种简单可行的调谐方法对高频超材料设计具有非常重要的意义, 同时也对太赫兹和光频超材料的实际应用具有显著的推动作用.

本文通过数值仿真研究了双开口谐振环 (DSRR) 超材料的谐振行为, 研究发现这种 DSRR 单元在平行电磁波激励下可以在不同的频段分别

* 河南省杰出青年科学基金 (批准号: 0612002200) 和河南省科技攻关计划 (批准号: 0623021600) 资助的课题.

† E-mail: fanjing8886@yahoo.com.cn

表现出磁谐振和电谐振. 当外加电场 E 与 DSRR 的双开口平行的时候, DSRR 受激励得到的磁谐振和电谐振强度最大. 随着 DSRR 超材料沿磁场 H 方向旋转, 其磁谐振和电谐振频率位置略有变化, 但谐振强度均出现明显降低. 旋转的角度越大, 磁谐振和电谐振强度下降越大. 本文提出的超材料调谐方法只需要简单地旋转材料, 而不需要改变原有超材料单元的结构或者增加额外的激励场, 极大地简化了可调谐超材料的制备及应用. 同时, 这种简单的方法可以应用于更高频段的超材料调谐, 拓展了太赫兹频段和光频段超材料的实际应用.

2. 数值仿真

图 1 所示为我们设计的双开口 DSRR 的单元结构示意图, 其结构参数如下: DSRR 的外环半径 $r_2 = 2 \text{ mm}$, 内环半径 $r_1 = 1.7 \text{ mm}$, 环的开口宽度 $g = 0.3 \text{ mm}$. 介质基板为 FR4 环氧玻璃, 其介电常数为 4.9, 损耗角正切为 0.025, 基板厚度 $h = 0.8 \text{ mm}$. DSRR 阵列在 x, y, z 三个方向的晶格常数相同, 均为 $d = 5 \text{ mm}$.

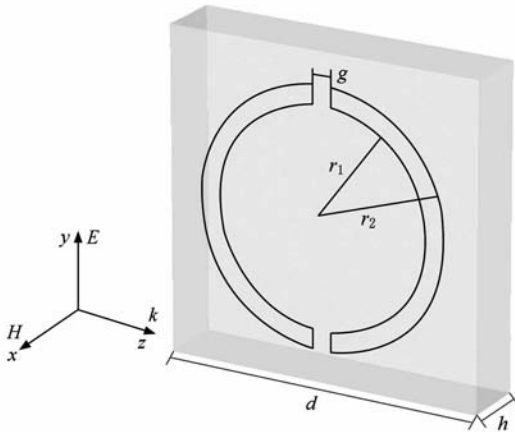


图 1 金属 DSRR 的单元结构示意图

本文的数值仿真采用基于有限积分技术的德国商用软件 CST Microwave Studio. 我们选取的金属为铜, 电导率为 $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$. 仿真时, 将 x 方向设为理想磁边界, y 方向设为理想电边界, z 方向设为开放边界, 模拟周期性阵列在平面波下的激励.

3. 结果及讨论

3.1. 透射系数曲线及电磁谐振模式

依据上述的结构参数和设置, 我们数值仿真得

到了 DSRR 的透射系数幅度曲线, 结果如图 2 所示. 仿真发现 DSRR 结构出现了两个禁带, 其幅度 S_{21} 分别在 13.2 GHz 时达到极小值 -21.6 dB , 在 18.3 GHz 时达到极小值 -16.8 dB . DSRR 在外加电磁场激励下产生相应的谐振是形成这两个禁带的根本原因. 为了更好分析这种结构的谐振行为, 我们在 13.2 和 18.3 GHz 两个谐振频率处通过仿真监控金属的表面感应电流, 得到的电流分布如图 3 所示.

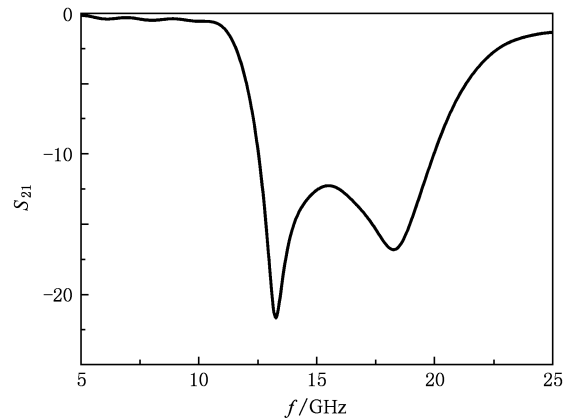


图 2 数值仿真得到的透射系数幅度曲线

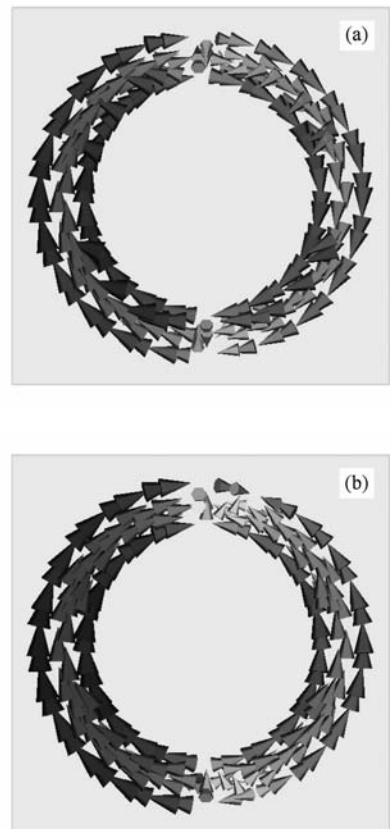


图 3 不同频率下 DSRR 的表面电流分布 (a)13.2 GHz, (b)18.3 GHz

从图 3 可以看到,在 13.2 GHz 时,金属 DSRR 感应出环形电流回路,表现为外磁场激励下的磁谐振响应;在 18.3 GHz 时,金属 DSRR 表面的感应电流呈偶极振荡模式,表现出外电场激励下的电谐振响应.

3.2. DSRR 谐振强度的调谐

在外加激励的电磁波不变的条件下,将 DSRR 超材料绕 x 轴旋转,可以改变电场和磁场分量对金属 DSRR 结构的响应.我们定义 θ 为 DSRR 绕 x 轴顺时针旋转的角度.图 4 是数值仿真得到的不同 θ 角对应的透射系数幅度曲线.从图 4 可以看到:对于第一个磁谐振峰,随着 θ 角从 0° 到 90° 的变化,谐振频率略微向高频移动,从 13.2 GHz 变化到 13.5 GHz,可以认为基本不变,但谐振强度显著下降,禁带最小值从 -21.6 dB 变化到 -7.4 dB.对于第二个电谐振峰,随着 θ 角从 0° 到 90° 的变化,谐振频率基本保持在 18.1—18.3 GHz 附近,但谐振强度迅速降低.当 $\theta \geq 60^\circ$ 时已经观察不到电谐振的禁带,此时电谐振已经消失.我们的数值仿真表明,通过简单旋转 SRR 超材料,可以有效地调节其磁谐振和电谐振强度,随着旋转角度的增大,磁谐振和电谐振的强度均表现出降低的趋势.相比以前的调谐方式^[15-18],我们提出的调谐方式只需要旋转超材料,而不需要改变超材料的组成结构,极大地简化了调谐的方法和步骤,为更高频段(也就是更小谐振单元结构)的超材料的调谐提供了简单可行的方法.

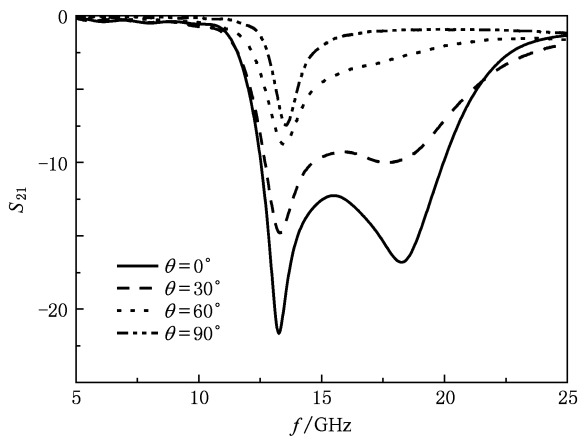


图 4 不同旋转角度下的透射系数幅度曲线

超材料中谐振的存在一般都伴随着相应的相位突变,相位变化越剧烈,表明谐振越强.图 5 给出

了不同 θ 角对应的透射系数的相位曲线.从图 5 可以看出,在 13.3 GHz 附近,所有的相位曲线都发生了明显的突变,随着 θ 角的变大,相位曲线突变越来越小.这说明 DSRR 结构在不同 θ 角下都具有磁谐振,随 θ 角的变大,磁谐振逐渐减弱.从图 5 还可以看出,在 18.2 GHz 附近, $\theta \leq 30^\circ$ 的相位曲线有明显的突变,随着 θ 角的变大,相位曲线突变越来越小,当 $\theta \leq 60^\circ$ 时,相位曲线基本成平滑的直线,没有突变.这说明随着 θ 角的变大 DSRR 的电谐振强度迅速下降,当 $\theta \geq 60^\circ$ 时电谐振已经完全消失.由以上所述可知,相位曲线与幅度曲线能很好相符.从数值仿真可以看出,通过简单旋转 DSRR 超材料,也可以有效地调节超材料的透射相位,这种特性有望用来实现相位调制器.

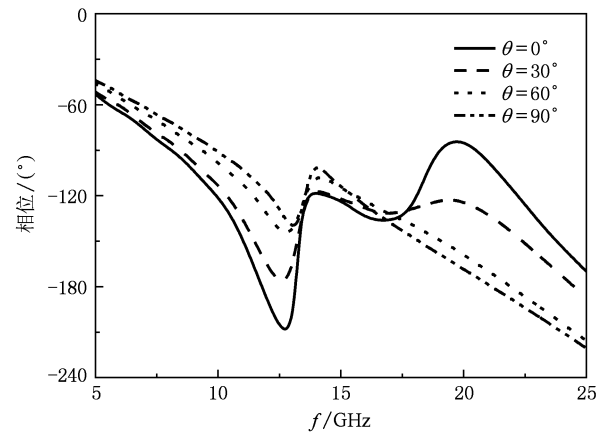


图 5 不同旋转角度下的透射系数相位曲线

4. 结 论

本文通过数值仿真研究了 DSRR 结构的谐振行为,在平行电磁波激励下,这种 DSRR 单元可以在不同的频段分别表现出磁谐振和电谐振.研究发现,当外加电场 E 与 DSRR 的双开口平行的时候,DSRR 受激励得到的磁谐振和电谐振强度最大.随着 DSRR 超材料沿磁场 H 方向顺时针旋转,旋转角度 θ 从 0° 到 90° 变化,其磁谐振频率基本保持在 13.2—13.5 GHz,但谐振强度显著下降,禁带最小值从 -21.6 dB 变化到 -7.4 dB,对应的透射相位突变也逐渐降低.随着旋转角度 θ 从 0° 到 90° 的变化,DSRR 的电谐振频率基本保持在 18.1—18.3 GHz,谐振强度迅速下降,当 $\theta \geq 60^\circ$ 时已经观测不到电谐振,对应的相位曲线也不再出现突变.

本文提出的超材料调谐方法只需要简单地旋转材料,而不需要改变原有超材料单元的结构或者增加额外的激励场,极大地简化了可调谐超材料的制备及应用. 这种简单的方法在电磁开关、相位调

制等方面具有许多潜在的应用,同时也可以应用于更高频段的超材料调谐,拓展了太赫兹频段和光频段超材料的实际应用.

-
- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Shelby R, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [3] Chen H S, Ran L X, Huangfu J T, Zhang X M, Chen K S, Grzegorzcyk T M, Kong J A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 057605
- [4] Dong Z G, Xu M X, Lei S Y, Liu H, Li T, Wang F M, Zhu S N 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 064101
- [5] Dong Z G, Liu H, Li Tao, Zhu Z H, Wang S M, Cao J X, Zhu S N, Zhang X 2008 *Opt. Express* **16** 20974
- [6] Zhou J F, Zhang L, Tuttle G, Koschny T, Soukoulis C M 2006 *Phys. Rev. B* **73** 041101
- [7] Zhu W R, Zhao X P, Guo J Q 2009 *Appl. Phys. Lett.* **106** 093511
- [8] Zhu W R, Zhao X P 2008 *J. Appl. Phys.* **92** 241116
- [9] Kafesaki M, Tsiapa I, Katsarakis N, Koschny T, Soukoulis C M, Economou E N 2007 *Phys. Rev. B* **75** 235114
- [10] Sun M Z, Zhang C M, Song X P, Liang G Y, Sun Z B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6179 (in Chinese) [孙明昭、张淳民、宋晓平、梁工英、孙占波 2009 物理学报 **58** 6179]
- [11] Zhang C M, Sun M Z, Yuan Z L, Song X P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1758 (in Chinese) [张淳民、孙明昭、袁志林、宋晓平 2009 物理学报 **58** 1758]
- [12] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977
- [13] Ma H, Qu S B, Xu Z, Zhang J Q, Wang J F 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1025
- [14] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [15] Zhu W R, Zhao X P 2009 *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 2382
- [16] Shadrivov I V, Morrison S K, Kivshar Y S 2006 *Opt. Express* **14** 9344
- [17] Degiron A, Mock J J, Smith D R 2007 *Opt. Express* **15** 1115
- [18] Zhao Q, Kang L, Du B, Li B, Zhou J 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 011112
- [19] Kang L, Zhao Q, Zhao H J, Zhou J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 171909

Tunability in metamaterials with mechanical rotation^{*}

Fan Jing^{1)†} Cai Guang-Yu²⁾

1) (*Department of Electronics and Electrical Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China*)

2) (*Department of Mechanical and Electrical Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China*)

(Received 26 January 2010; revised manuscript received 11 June 2010)

Abstract

We study the tunable resonance characteristics of double split ring resonator (DSRR) at microwave band numerically. For the incident electromagnetic wave parallel to the incident plane, the DSRR structure shows magnetic and electric resonances at different frequencies respectively. When the E polarization along the two splits of the DSRR, the magnetic and the electric resonances have the strongest resonant intensities. As the DSRR metamaterial rotates along the H field, the frequencies of magnetic and electric resonances are kept unchanged, however, the resonant intensities decrease rapidly. The tunable metamaterial proposed in this paper only need rotate the metamaterial without structure changes or additional applied field, and has potential applications in electromagnetic switch and phase modulation. This simple tunable method could be used for higher frequency metamaterial, and extend the applications at terahertz and optical frequencies.

Keywords: metamaterials, split ring resonator, tunability

PACC: 4270Y

^{*} Project supported by the Science Foundation for Outstanding Young Scholars of Henan Province, China (Grant No. 0612002200) and the Science and Technology Key Program of Henan Province, China (Grant No. 0623021600).

[†] E-mail: fanjing8886@yahoo.com.cn