

超材料谐振子间的电耦合谐振理论与实验研究

梁浩 李剑生 郭云胜

Theoretical and experimental study of the electric resonant coupling between two metamaterial resonators

Liang Hao Li Jian-Sheng Guo Yun-Sheng

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 144101 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.144101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2015/V64/I14>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于十字形结构的相位梯度超表面设计与雷达散射截面缩减验证

[Design and radar cross section reduction experimental verification of phase gradient metasurface based on cruciform structure](#)

物理学报.2015, 64(16): 164102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164102>

一种采用互补结构的宽阻带共模缺陷地滤波器

[A broad stopband common-mode suppression defected ground structure filter with complementary structure](#)

物理学报.2015, 64(16): 164101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164101>

基于变换光学的椭圆形透明聚集器的设计研究

[Design and study of the elliptically cylindrical transparent concentrator based on transformation optics](#)

物理学报.2015, 64(15): 154102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154102>

基于雷达海杂波的区域性非均匀蒸发波导反演方法

[Inversion of regional range-dependent evaporation duct from radar sea clutter](#)

物理学报.2015, 64(12): 124101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124101>

圆极化波反射聚焦超表面

[Circularly polarized wave reflection focusing metasurfaces](#)

物理学报.2015, 64(12): 124102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124102>

## 超材料谐振子间的电耦合谐振理论与实验研究\*

梁浩<sup>1)</sup> 李剑生<sup>2)</sup> 郭云胜<sup>2)†</sup>

1)(内蒙古科技大学信息工程学院, 包头 014010)

2)(内蒙古科技大学数理与生物工程学院, 包头 014010)

(2014年12月19日收到; 2015年1月26日收到修改稿)

通过将两个金属开口环谐振器口对口地放置, 实现了超材料谐振子间的电耦合谐振. 对电耦合谐振的微波等效电路进行了理论分析和数值计算, 结果表明耦合后的超材料谐振子能产生两个谐振频率, 其中一个随耦合强度的增加逐渐向低频方向移动, 而另一个固定在单谐振子的谐振频率处不变. 微波透射谱的实验测试和电磁仿真结果表明, 两个谐振峰随耦合强度的增加分别向低频和高频方向移动. 分析表明: 低频谐振峰的位置主要是由超材料谐振子间的电耦合强度决定的; 高频谐振偏离单谐振子的谐振频率主要是由不可避免的磁耦合引起的, 而且在耦合间距越小时磁耦合影响越大. 提出的基于超材料谐振子间的电磁耦合实现的双频谐振及其可调性极大地增加了超材料的设计与应用空间.

关键词: 超材料谐振子, 耦合谐振, 微波等效电路, 电磁波

PACS: 41.20.Jb, 81.05.Xj

DOI: 10.7498/aps.64.144101

## 1 引言

谐振是自然界中的一种普遍现象. 两个具有相同谐振频率的物体(谐振子)之间的谐振耦合, 在不同的耦合强度时会有不同的频率选择特性和能量传输效率<sup>[1]</sup>. 谐振耦合原理在力学、电磁学和生物学等众多领域都有着广泛的应用. 近十几年来, 通过对亚波长谐振结构单元的周期性排列, 人们可以获得一些自然材料所不具有的新奇物理性质的超材料(metamaterials)<sup>[2-8]</sup>. 相应地, 把组成超材料的这些亚波长谐振结构单元称之为超材料谐振子<sup>[9-13]</sup>. 大多数电磁超材料的奇异行为是超材料谐振子对外场响应的集体的宏观效果, 超材料谐振子之间的相互作用比较微弱, 一般不予考虑. 然而, 当两个谐振子发生强耦合作用时, 不同的耦合强度对外场的响应表现出不同的特性. 所以, 利用超材料谐振子之间的相互耦合作用并且对这种耦合作用加以调控, 就会大大增加超材料的设计与应用空

间. 目前, 对超材料谐振子间的电磁耦合谐振已有相关的研究和报道<sup>[14-19]</sup>. 本文将最简单常用的超材料谐振结构单元——金属开口环谐振器(metal split-ring resonators)口对口地放置, 实现了超材料谐振子间的电耦合谐振. 对电耦合超材料谐振子进行了理论分析、数值计算、实验测试和电磁仿真, 结果都表明耦合后的超材料谐振子能产生两个谐振峰, 其中一个谐振峰与电耦合(即耦合电容)的大小有关, 另一谐振峰与电耦合的大小无关. 在较高谐振频率处, 实验测试结果与理论分析所得结果有一定的差异, 分析表明该差异主要是由超材料谐振子间的磁耦合引起的. 本文提出的基于超材料谐振子间的电磁耦合谐振对实现超材料的多频段负折射、多频段透射增强等现象提供了一个新的有效方法.

## 2 模型与理论

金属开口环谐振器是最简单常用的超材料谐振子, 它的金属线部分相当于一个电感器, 缺口部

\* 内蒙古自然科学基金(批准号: 2015MS0107)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gys03018@imust.edu.cn

分相当于一个电容器. 当外界电磁波的磁场分量穿过金属线圈, 或者是电场分量横跨过金属缺口的两端, 就会使外场能量耦合到金属开口环谐振器中, 从而形成一个  $LC$  谐振回路. 若把两个金属开口环谐振器的缺口端部分相互靠近, 相邻金属片之间产生的局域电场就会使储存在两谐振子中的电磁能量通过它们进行耦合交换, 从而实现两个超材料谐振子间的电耦合谐振, 相关模型及电路如图 1 所示. 图 1(a) 中正方形金属线框的外边长为 5 mm, 金属线宽为 0.75 mm, 缺口部分为 1 mm, 两谐振子的间距  $d$  为可变值. 金属线选用铜材料, 厚度为 0.018 mm, 衬底为刚性 FR4 板, 板的厚度为 1.0 mm, 介电常数为 4.2, 介质损耗角正切为 0.01. 外界电磁波作用时波矢  $k$  方向为沿着超材料谐振子排列的方向, 电场偏振方向  $E$  为跨过金属缺口的方向, 这样使得两超材料谐振子通过它们自身的电场耦合起来, 而不是在外界电场作用下的直接耦合. 图 1(b) 中  $L$  为金属线的等效电感,  $C$  为金属缺口的等效电容,  $C_x$  为两谐振子的耦合电容. 通过电路  $\Pi$ -T 转换关系可得两电耦合超材料谐振子的简化电路, 如图 1(c) 所示. 图 1(b) 和图 1(c) 中电容之间的关系为  $C_1 = C + C_x$ ,  $C_2 = (2C^2 + 2CC_x)/C_x$ . 图 1(c) 中整个电路的方程可表示为

$$L \frac{di_a}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_a dt + \frac{1}{C_2} \int (i_a - i_b) dt = 0, \quad (1)$$

$$L \frac{di_b}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_b dt + \frac{1}{C_2} \int (i_b - i_a) dt = 0, \quad (2)$$

这里,  $i_a = I_a e^{j\omega t}$ ,  $i_b = I_b e^{j\omega t}$ , 它们分别为图 1(c) 中左边和右边回路中的电流. 根据 (1), (2) 两式可得

$$-\omega^2 I_a + \frac{1}{L} \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) I_a - \frac{1}{LC_2} I_b = 0, \quad (3)$$

$$-\omega^2 I_b + \frac{1}{L} \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) I_b - \frac{1}{LC_2} I_a = 0. \quad (4)$$

由 (3) 和 (4) 式可得

$$(\omega^2 - \omega_a^2) I_a = -\omega_{ac}^2 I_b, \quad (5)$$

$$(\omega^2 - \omega_b^2) I_b = -\omega_{bc}^2 I_a, \quad (6)$$

这里  $\omega_a^2 = \omega_b^2 = 1/(LC_1) + 1/(LC_2)$ ,  $\omega_{ac}^2 = \omega_{bc}^2 = 1/LC_2$ . 根据 (5), (6) 两式可得

$$\omega^2 = \omega_a^2 \pm \omega_{ac}^2. \quad (7)$$

所以, 图 1(c) 中两耦合谐振子的谐振频率为

$$\omega_1^2 = 1/LC_1, \quad (8)$$

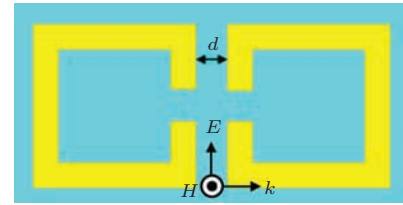
$$\omega_2^2 = 1/LC_1 + 2/LC_2. \quad (9)$$

根据电路图 1(b) 和图 1(c) 之间的关系, 可得图 1(a) 所示的两个电耦合超材料谐振子系统的谐振频率为

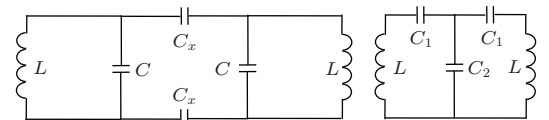
$$\omega_1^2 = 1/L(C + C_x), \quad (10)$$

$$\omega_2^2 = 1/LC. \quad (11)$$

所以, 当采用电耦合的方式把两超材料谐振子联系起来, 原来的一个谐振频率分裂为两个, 其中的一个谐振频率随耦合强度的增加逐渐向低频方向移动, 另外的一个谐振频率与耦合强度没有关系而保持不变. 为了证明以上理论分析的正确性, 我们对图 1(b) 所示的耦合电路中的电流方向和大小进行了定性分析和定量的计算. 图 2 是根据以上谐振频率的表达式得到的电耦合谐振电路中电流的分布和流向. 图 2(a) 中, 一部分电流通过了耦合电容, 故谐振频率与耦合电容有关. 耦合电容越大, 谐振频率点越往低频方向移动. 图 2(b) 中, 电流分别在左右两个回路中流动, 并没有通过耦合电容, 故与耦合电容的大小没有关系, 谐振频率应该保持不变.



(a)



(b)

(c)

图 1 (网刊彩色) 电耦合超材料谐振子模型及电路图 (a) 电耦合超材料谐振子模型; (b) 电耦合超材料谐振子等效电路图; (c) 电耦合超材料谐振子简化电路图

Fig. 1. (color online) Mode and circuit of the electrically coupled metamaterial resonators: (a) mode of the electrically coupled metamaterial resonators; (b) equivalent circuit of the electrically coupled metamaterial resonators; (c) simplified circuit of the electrically coupled metamaterial resonators.

为了定量地表达电路中的电流与耦合电容之间的关系, 我们采用电路仿真软件 ADS2009 对图 1(b) 中任意参数值的电耦合超材料谐振子的微波电路模型进行了仿真, 结果如图 3 所示. 图 3(a)

中, 电感  $L$  设置为 1 nH, 电感引入的寄生电阻可设置为  $0.1 \Omega$  (图中未标出), 电容  $C$  设置为 1 pF. 交流电源的功率设置为 1 W, 工作频率设置为 1—7 GHz, 步长为 0.01 GHz.

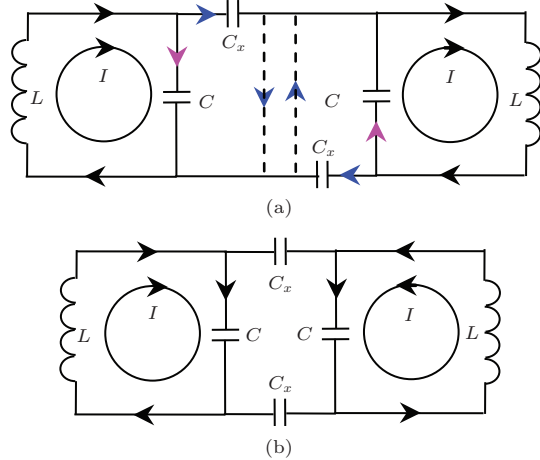


图 2 电耦合超材料谐振子电路中电流的分布和流向 (a) 在低频谐振时电流通过耦合电容; (b) 在单谐振子的谐振频率时电流没有通过耦合电容

Fig. 2. Distribution and direction of the current through the circuit of the electrically coupled metamaterial resonators: (a) current through the coupling capacitor at lower resonance frequency; (b) no current through the coupling capacitor at the resonance frequency of the single metamaterial resonator.

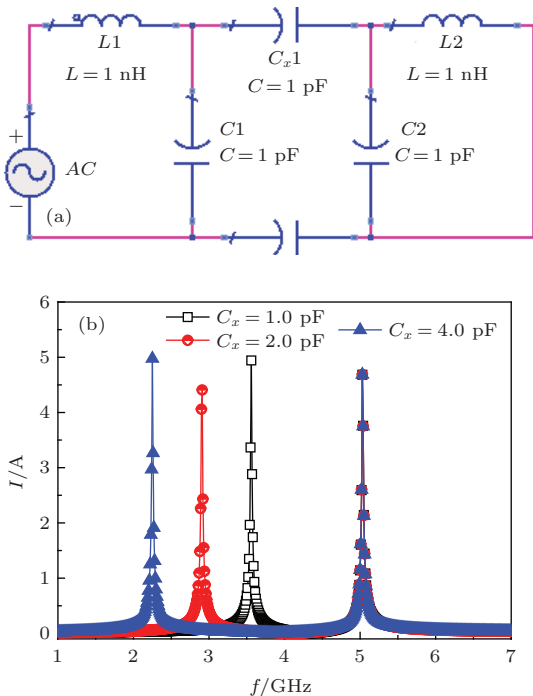


图 3 (网刊彩色) 电耦合超材料谐振子电路及输出电流 (a) 电路仿真模型及参数; (b) 输出电流随频率的变化

Fig. 3. (color online) Output currents and circuit of the electrically coupled metamaterial resonators: (a) circuit simulation models and parameters; (b) output currents varying with the operating frequency.

当耦合电容  $C_x$  分别为 1, 2 和 4 pF 时, 输出电流如图 3 (b) 所示. 从图中可清楚地看出, 电耦合谐振的两超材料谐振子会产生两个谐振峰, 其中一个在单谐振子的谐振频率 5.0 GHz 处保持不变, 另外一个随着耦合电容的增加逐渐向低频方向移动, 耦合电容 1, 2 和 4 pF 时对应的谐振频率分别为 3.53, 2.89 和 2.25 GHz, 数值计算结果与理论分析的结果完全一致.

### 3 实验与仿真

图 4 是采用印刷电路板工艺加工制造的耦合间距分别为  $d = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$  和  $2.5$  mm 的五种电耦合超材料谐振子样品, 样品的其他参数与图 1 (a) 中的完全一致. 实验测试系统为两端分别连接在矢量网络分析仪 N5230C 上的矩形波导 WR-137, 每种样品切取大小为  $14 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$  的一个单元放在波导系统中测量透射谱. 为了和实验测试结果进行比较, 本文同时还采用电磁仿真软件 CST 对电耦合超材料谐振子进行电磁建模与仿真, 结果如图 5 所示. 图 5 (a) 的实验测试结果与图 5 (b) 的电磁仿真结果基本一致, 二者产生的微小误差是由实验过程中切取单元结构尺寸的不准确造成的. 实验与仿真结果都表明: 当采用电耦合的方式把两个金属开口环谐振器耦合起来, 它们会产生两个谐振频率, 分别低于和高于单谐振子的谐振频率; 当耦合强度逐渐增加时, 两谐振频率逐渐远离单谐振子的谐振频率. 例如, 从图 5 (a) 的实验结果可知, 单个金属开口环的谐振频率为 6.75 GHz; 当两个谐振子的耦合距离为 2.0 mm 时, 产生的两个谐振频率分别为 6.2 GHz 和 7.0 GHz; 当耦合距离为 0.5 mm 时, 两谐振频率分别为 5.5 GHz 和 7.5 GHz.

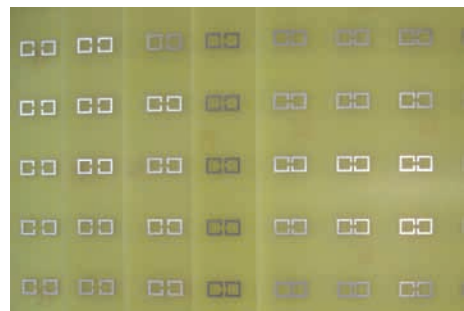


图 4 (网刊彩色) 电耦合超材料谐振子样品

Fig. 4. (color online) Samples of the electrically coupled metamaterial resonators.

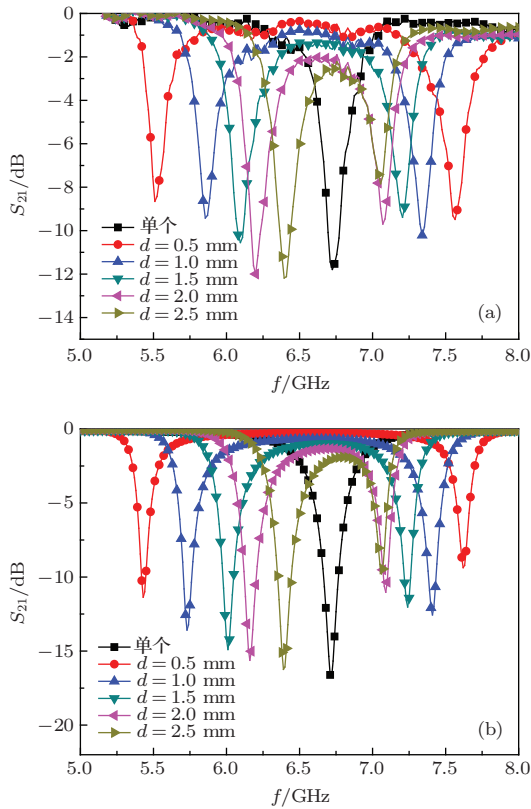


图5 (网刊彩色) 电耦合超材料谐振子的微波透射谱 (a) 实验结果; (b) 仿真结果  
 Fig. 5. (color online) Microwave transmission spectra of the electrically coupled metamaterial resonators: (a) experimental results; (b) simulation results.

### 4 分析与讨论

以上实验测试和电磁仿真得到的两个谐振频率中的低频部分与理论分析和数值计算所得结果完全一致, 而高频部分的差异比较大. 为此, 我们以耦合间距为0.5 mm的耦合谐振子为例, 分析电场矢量分布在两谐振频率6.2 GHz和7.0 GHz处的差异, 其电磁仿真结果如图6所示. 从图6(a)中可清楚地看出, 在低频6.2 GHz时, 耦合电容产生的电场把两超材料谐振子紧密地联系起来, 电磁能量在两谐振子之间进行交换. 结合图2(a)可知, 在低频谐振时, 两谐振子的相位是相同的, 耦合电容两极板的极性是正负相反的, 所以在图6(a)中两谐振子间有很强的耦合电场分布. 在高频7.0 GHz时, 图6(b)中的两超材料谐振子之间并没有产生明显的电场分布, 但此时耦合电容依然起着非常重要的作用. 根据图2(b)可知, 在高频谐振时, 两谐振子间的相位是相反的, 耦合电容两极板的电极性是相同的, 电场在两极板间的叠加后应该很微弱, 电磁

仿真结果与理论分析完全一致. 然而, 与图2相比, 图6中的微波频段下的电容和电感都不是真正意义上的集总参数元件. 尽管在两谐振子之间的耦合部分存在很大的金属缺口(目的是为了尽可能地产生电耦合谐振), 但是还会不可避免地产生磁耦合, 电磁仿真模型中的磁场矢量分布图(此处略)可证明这一点. 所以, 高频谐振偏离单谐振子的谐振频率以及此谐振频率随着耦合电场的增加逐渐向高频方向移动主要是由两超材料谐振子间的磁场耦合引起的. 而且, 两超材料谐振子之间的距离越小时, 耦合电场越大, 所以产生的耦合磁场也越大, 耦合磁场对谐振频率的影响就越显著, 这方面的内容可查阅相关文献[14—16].

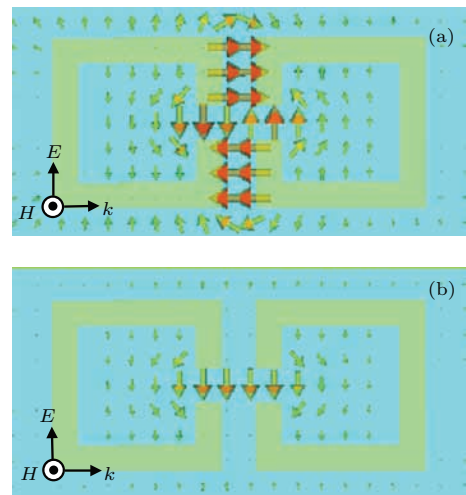


图6 (网刊彩色) 电耦合超材料谐振子在谐振频率处的电场分布 (a) 低频6.2 GHz; (b) 高频7.0 GHz  
 Fig. 6. (color online) Electric field distributions at the resonance frequencies of the electrically coupled metamaterial resonators: (a) at the lower resonance frequency of 6.2 GHz; (b) at the higher resonance frequency of 7.0 GHz.

为了定量描述磁耦合对两个超材料谐振子产生的高低频谐振峰位置的影响, 同时也为了和图5中所示的微波透射谱的结果进行比较, 我们对考虑磁耦合影响后的超材料谐振子及其放在矩形波导中的情况进行了分析, 得到的等效电路和微波透射谱的结果如图7所示. 图7(a)为同时考虑了两个超材料谐振子间的电耦合和磁耦合, 图中的各个等效电容和电感值的大小是在理论计算<sup>[20]</sup>的基础上利用电路仿真软件优化后最终确定的. 由于在实验测试和电磁仿真时, 矩形波导的特性阻抗设置为1 Ω, 所以图7(a)中的端口1和端口2的阻抗值也

设置为  $1 \Omega$ . 图 7(b) 为超材料谐振子放在矩形波导中的等效电路图, 中间的方框代表图 7(a) 中的等效电路部分. 应该注意的是, 在图 7(a) 中,  $S_{21}$  代表从端口 1 到端口 2 的透射系数, 而在图 7(b) 中, 此透射系数刚好处在矩形波导等效电路图中的导纳

部分. 所以, 图 7(a) 中的  $1-S_{21}$  代表图 7(b) 中的透射系数  $S_{21}$ . 图 7(c) 为不同耦合间距时的耦合电容和耦合电感值的大小, 其对应的透射系数如图 7(d) 所示, 它们基本上和图 5 所示的结果一致, 从而也说明了磁耦合对谐振频率的影响规律.

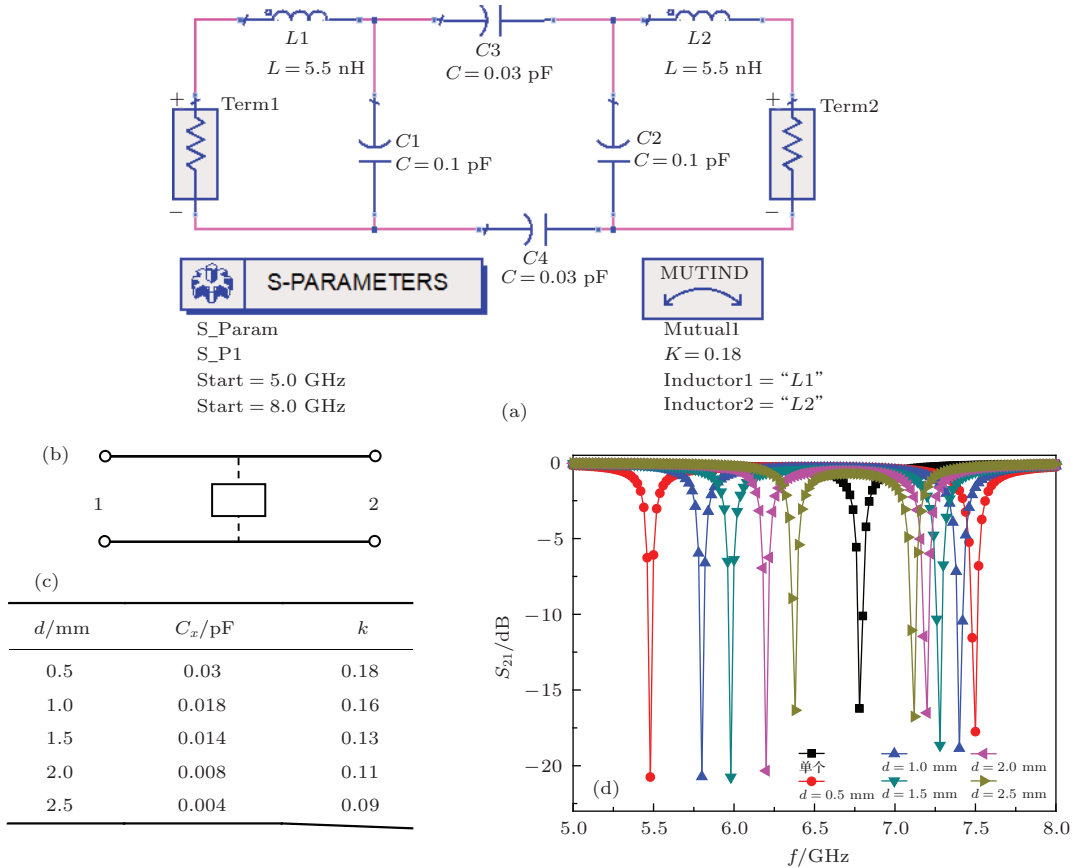


图 7 (网刊彩色) 具有磁耦合的两超材料谐振子的电路模型及微波透射谱 (a) 同时具有电耦合和磁耦合的两超材料谐振子的耦合电路图; (b) 内置耦合超材料谐振子的矩形波导的电路图; (c) 不同耦合间距时的耦合电容和耦合电感的大小; (d) 耦合超材料谐振子在矩形波导中的微波透射谱

Fig. 7. (color online) Circuit model and microwave transmission spectra of the two coupled metamaterial resonators added with the magnetic coupling: (a) circuit of the two coupled metamaterial resonators when containing simultaneously the electric and magnetic coupling; (b) circuit of the rectangular waveguide placed with the coupled metamaterial resonators; (c) value of the coupling capacitance and inductance at different coupling spacing; (d) microwave transmission spectra of the coupled metamaterial resonators placed in the rectangular waveguide.

## 5 结 论

本文系统地研究了基于金属开口环谐振器的电耦合超材料谐振子的双频谐振特性, 指出了两个谐振频率的变化规律. 对电耦合超材料谐振子的微波等效电路进行了理论分析和数值计算, 二者一致表明一个谐振频率随耦合电场的增加向低频方向移动, 另一个谐振频率与无耦合的单谐振子的谐振

频率一致, 与耦合电场的大小没有关系. 采用印刷电路板工艺加工制造了五种不同耦合间距的电耦合谐振超材料样品并进行了实验测试, 实验结果与电磁仿真软件的模拟结果基本一致, 但与等效电路的理论分析结果在较高谐振频率处有一定的差异, 该差异主要是由不可避免的磁耦合引起的, 而且在耦合间距越小时磁耦合影响越大. 电磁超材料产生奇异行为的频段是由超材料谐振子所处的谐振频率决定的. 本文提出了两个超材料谐振子电磁耦

合谐振的思想, 实现了超材料的双频谐振及可调特性, 为超材料的设计与应用提供了广阔的空间.

### 参考文献

- [1] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, Joannopoulos J D, Fisher P, Soljacic M 2007 *Science* **317** 83
- [2] Florijn B, Coulais C, van Hecke M 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 175503
- [3] Silva A, Monticone F, Castaldi G, Galdi V, Alu A, Engheta N 2014 *Science* **343** 160
- [4] Moitra P, Yang Y M, Anderson Z, Kravchenko I I, Briggs D P, Valentine J 2013 *Nat. Photon.* **7** 791
- [5] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K 2004 *Science* **305** 788
- [6] Shalaev V M 2007 *Nat. Photon.* **1** 41
- [7] Huang H Y, Ding S, Wang B Z, Zang R 2014 *Chin. Phys. B* **23** 064101
- [8] Li T H, Huang M, Yang J J, Yuan G, Cai G H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 054102
- [9] Al-Naib I A I, Jansen C, Koch M 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 083507
- [10] Schneider A, Shuvaev A, Engelbrecht S, Demokritov S O, Pimenov A 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 103907
- [11] Burckel D B, Wendt J R, Ten Eyck G A, Ellis A R, Brener I, Sinclair M B 2010 *Adv. Mater.* **22** 3171
- [12] Gabbay A, Reno J, Wendt J R, Gin A, Wanke M C, Sinclair M B, Shaner E, Brener I 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 203103
- [13] Guclu C, Luk T S, Wang G T, Capolino F 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 123101
- [14] Li T Q, Liu H, Li T, Wang S M, Wang F M, Wu R X, Chen P, Zhu S N, Zhang X 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 131111
- [15] Liu H, Genov D A, Wu D M, Liu Y M, Liu Z W, Sun C, Zhu S N, Zhang X 2007 *Phys. Rev. B* **76** 073101
- [16] Liu N, Liu H, Zhu S N, Giessen H 2009 *Nat. Photon.* **3** 157
- [17] Cheng Y Z, Gong R Z, Cheng Z Z, Nie Y 2014 *Appl. Opt.* **53** 5763
- [18] Cheng Y Z, Nie Y, Cheng Z Z, Gong R Z 2014 *Prog. Electromagn. Res.* **145** 263
- [19] Cheng Y Z, Cheng Z Z 2011 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **53** 615
- [20] Zhou J F, Economou E N, Koschny T, Soukoulis C M 2006 *Opt. Lett.* **31** 3620

# Theoretical and experimental study of the electric resonant coupling between two metamaterial resonators\*

Liang Hao<sup>1)</sup> Li Jian-Sheng<sup>2)</sup> Guo Yun-Sheng<sup>2)†</sup>

1) (School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

2) (School of Mathematics, Physics and Biological Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

( Received 19 December 2014; revised manuscript received 26 January 2015 )

## Abstract

In this paper, we realize the electrically coupled resonances between two metamaterial resonators based on two metal split-ring resonators gap-to-gap placed. The theoretical analysis and numerical calculation of the microwave equivalent circuit of the electrically coupled metamaterial resonators are performed. The results show that there are two resonance frequencies produced by the two coupled metamaterial resonators. For the two resonance frequencies, one gradually shifts towards the lower frequency with the coupling strength increasing, while the other is fixed at the resonance frequency of the single metamaterial resonator. The measured and simulated results of the microwave transmission spectra show that the two resonance peaks move respectively towards the lower and higher frequency with the coupling strength increasing. The analysis shows that the lower resonance frequency is mainly determined by the electrical coupling strength between the two metamaterial resonators, and the difference between the higher resonance frequency and the resonance frequency of the single resonator is mainly caused by the inevitable magnetic coupling between the two resonators. Moreover, the smaller the coupling space, the greater the influence of magnetic coupling is. The proposed dual resonance property and its tunability based on the electromagnetic coupling between the two metamaterial resonators greatly enhance the scopes of the design and application for metamaterials.

**Keywords:** metamaterial resonators, coupling resonance, microwave equivalent circuit, electromagnetic wave

**PACS:** 41.20.Jb, 81.05.Xj

**DOI:** [10.7498/aps.64.144101](https://doi.org/10.7498/aps.64.144101)

---

\* Project supported by the Natural Science Foundation of Inner Mongolia, China (Grant No. 2015MS0107).

† Corresponding author. E-mail: [gys03018@imust.edu.cn](mailto:gys03018@imust.edu.cn)