

文章编号: 2096-1618(2018)01-0039-05

# 基于方形单开口环超材料的有源频率选择表面设计

邓彪, 唐涛, 余影

(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**设计了一种基于方形单开口环超材料的有源频率选择表面,由尺寸为7 mm×7 mm×0.25 mm的方形单开口环超材料单元体按10×10的周期排列构成,超材料单元体的介质基板采用FR4材料,在表面敷上方形单开口环铜片,能够在1~10 GHz(L、S、C、X频段)内保持介电常数、磁导率和折射率同时为负数。阐述了S参数反演法的推导过程,同时通过S参数反演法,证明该结构体是符合超材料性能的。在单元结构体之间加载可变贴片电容,通过改变加载在有源器件两端的电压大小,实现有源频率选择表面的谐振频率可调性。

**关键词:**超材料;有源频率选择表面;S参数反演法;可变贴片电容

**中图分类号:**TN82

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2018.01.008

## 0 引言

有源频率选择表面(active frequency selective surface, AFSS)也称为可调FSS<sup>[1]</sup>,是指在传统无源FSS单元上添加如贴片电容、PIN二极管、变容二极管等有源器件来实现电磁特性动态调节的FSS<sup>[2]</sup>。AFSS有效地解决了无源FSS其谐振频率不能被改变的缺陷,使得频率选择表面能够适应复杂多变的电磁环境,这为设计可调电磁屏蔽室、新型有源雷达天线、可调空间电磁滤波器、智能吸波材料等提供了新的思路,在信息安全、雷达隐身、抗电磁干扰以及防电磁辐射等领域起着重要的作用,因此得到了广泛的关注<sup>[3-5]</sup>。

超材料(Metamaterials)是指一些具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合材料,它不仅包括介电常数 $\epsilon$ 和磁导率 $\mu$ 同时为负的左手材料,也包括介电常数或者磁导率单独小于1以及单独小于0的特殊材料,广义的超材料包括光子晶体、左手材料、超磁材料、金属水<sup>[6-7]</sup>。从本质上讲,超材料是通过在多种物理结构上的设计来突破某些表现自然规律的限制,从而获得超常的材料功能<sup>[8]</sup>。由于超材料独特的电磁特性,使其可以实现负折射率、负群速度、电磁波极化控制和天线等微波器件的小型化等,因此超材料成为近年来国内外的研究热<sup>[9-10]</sup>。

设计了一种基于方形单开口环超材料的有源频率选择表面,由尺寸为7 mm×7 mm×0.25 mm的方形单开口环超材料单元体按10×10的周期排列构成,总尺寸为70 mm×70 mm×0.25 mm。相比较文献[11-14]设计中的超材料单元体只能在L、S、C、X频段中的某一个或某两个频段内,保持介电常数或是磁导率其中

之一为负数(即单负性能超材料),设计的超材料单元体能够在1~10 GHz保持介电常数和磁导率同时为负数(即双负性能超材料),且折射率也小于0。同时采用S参数反演法,获取了单元结构的介电常数、磁导率和折射率,证明单元体的超材料性能和频率选择特性。将设计的单元结构按周期排列为频率选择表面,并在单元结构间加载可变贴片电容,通过改变加载在可变电容两端的电压大小,实现在5~5.5 GHz有源频率选择表面的谐振频率可调性。

## 1 S参数反演法

因为超材料具有天然材料不具备的超常物理性质,比如“左手材料”其介电常数和磁导率同时都小于0,所以超材料特性可以由介电常数和磁导率来确定。为获取超材料的特性参数,如有效介电常数、有效磁导率、阻抗系数和折射率等,需要借助S参数反演法。目前常用的S参数反演法有NRW(nicolson-ross-weir)方法和TR(transmission reflection)方法两种<sup>[15]</sup>。

NRW方法由于其简单性,因此被广泛利用。下面给出此公式演算过程:首先引入

$$V_1 = S_{21} + S_{11} \quad (1)$$

$$V_2 = S_{21} - S_{11} \quad (2)$$

可以得到

$$\epsilon_r \approx \frac{c}{j\pi fd} \frac{1 - V_1}{1 + V_1} \quad (3)$$

$$\mu_r \approx \frac{c}{j\pi fd} \frac{1 - V_2}{1 + V_2} \quad (4)$$

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (5)$$

式(3)~(5)中的 $\epsilon_r$ 表示有效介电常数, $\mu_r$ 表示有效磁导率, $d$ 表示波传播方向上的介质基板厚度, $n$ 表示

收稿日期:2017-06-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41375042);四川省科技支撑计划资助项目(2017GZ0300)

折射率。虽然这种方法可以简单的推算出超材料的有效介电常数和磁导率,但其无法求得阻抗参数和分支指数复杂度。

TR 方法也是一种简单的  $S$  参数反演法,以下介绍其推算过程:

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

(6)

$$e^{inkd} = \frac{S_{21}}{1 - S_{11} \frac{z - 1}{z + 1}}$$

(7)

$$n = \frac{1}{kd} [\{ [\ln(e^{inkd})]'' + 2m\pi \} - i [\ln(e^{inkd})]']$$

(8)

$$\varepsilon_r = \frac{n}{z}$$

(9)

$$\mu_r = nz$$

(10)

式 (6) ~ (10) 中的  $[\ln(e^{inkd})]''$  表示二阶导数,  $[\ln(e^{inkd})]'$  表示一阶导数,  $m$  表示分支指数,  $k$  表示波矢量,  $n$  表示折射率,  $z$  表示阻抗系数。

2 超材料单元体设计

设计的方形单开口环超材料单元体结构如图 1 所示,图中所标参数的具体尺寸如表 1 所示,单元体采用 FR4 材料板作介质基板,其厚度为 0.25 mm,材料的介电常数为 4.4 和损耗角正切为 0.02,在其表面敷上两个相互嵌套的方形环铜片,并对外环做开口处理。

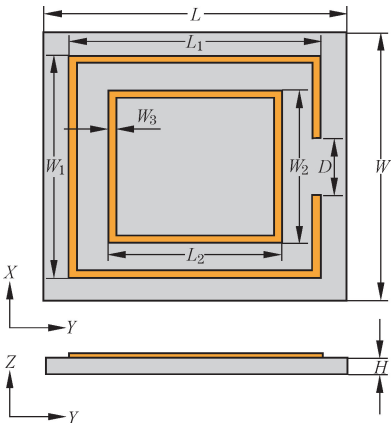


图 1 方形单开口环单元体结构图

表 1 方形单开口环结构体参数数值表/mm

参数	取值	参数	取值
$L$	7	$W$	7
$L_1$	5.8	$W_1$	5.8
$L_2$	4	$W_2$	4
$D$	1.5	$W_3$	0.2
$H$	0.25		

为获取该单元体的  $S$  参数,采用时域有限元仿真方法对该单元结构体进行全波仿真。设置该单元体外围空气腔在  $Y$  轴方向上的平面为良导体 (PEC) 边界,在  $Z$  轴方向上的平面为良磁体 (PMC) 边界,在  $X$  轴方向上为平面波传播方向,可得到所设计单元结构体的  $S$  参数曲线,如图 2 所示。

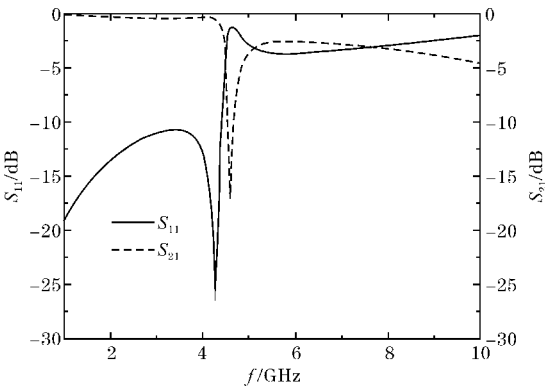
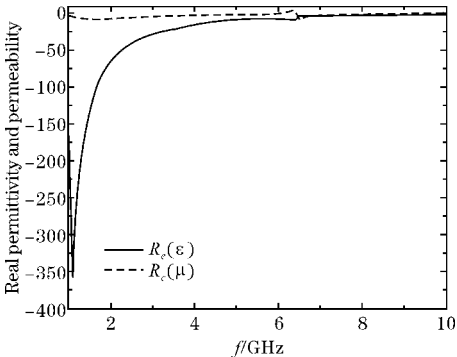
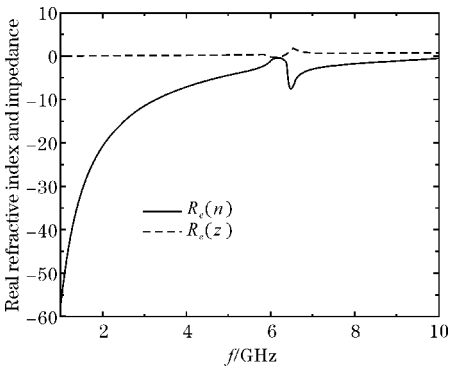


图 2 单元结构体的  $S$  参数曲线图

利用前面提到的  $S$  参数反演法,可以获得该单元体的有效介电常数、有效磁导率、阻抗系数和折射率,结果如图 3 所示。从图 3(a) 可以看到:在 1 ~ 10 GHz,该单元体的介电常数和磁导率同时都为负数,同时从图 3(b) 也可以看到在 1 ~ 10 GHz,该单元体的折射率是小于 0 的,因此证明了该单元体是符合超材料性能的,并且是属于双负性能超材料结构体。

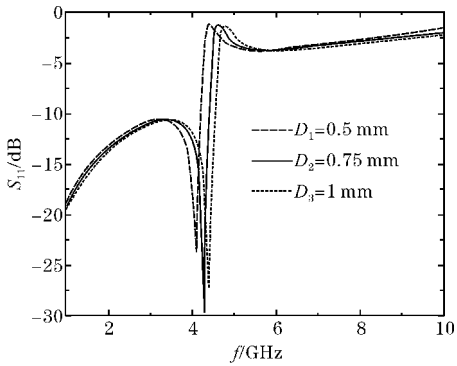


(a) 有效介电常数和有效磁导率

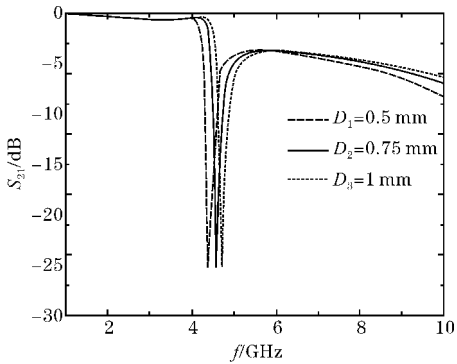


(b) 阻抗系数和折射率

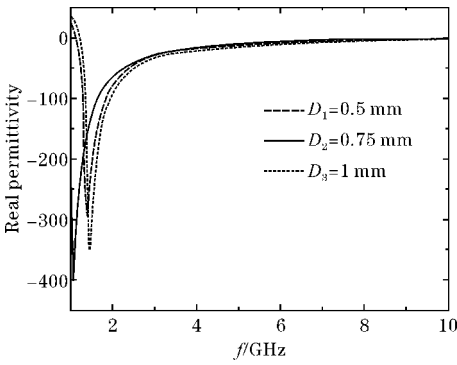
图 3 单元结构体的电磁特性参数图



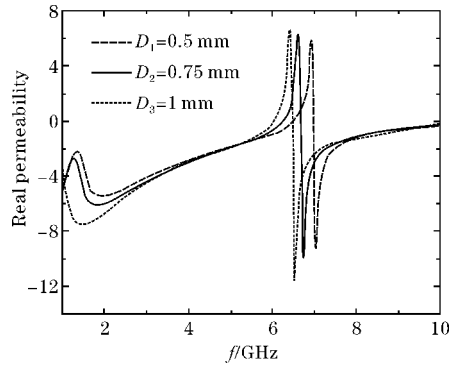
(a)  $S_{11}$  随参数  $D$  的变化曲线图



(b)  $S_{21}$  随参数  $D$  的变化曲线图



(c) 有效介电常数随参数  $D$  的变化曲线图



(d) 有效磁导率随参数  $D$  的变化曲线图

图 4 单元结构体的电磁特性随参数  $D$  的变化曲线图

为更加直观地了解超材料单元结构体参数对其性能的影响,对开口环的开口大小参数  $D$  进行了分析。

单元结构体的电磁特性随参数  $D$  的变化曲线如图 4 所示。可以明显地观察到:在图 4(a) 和 (b) 中,随着开口参数  $D$  的不断变大,超材料单元结构体的谐振频率也不断变大;在图 4(c) 和 (d) 中,随着参数  $D$  的不断变大,单元结构体的有效磁导率小于 0 的频段发生微小改变,而只有当  $D=0.75$  mm 时,其有效介电常数才在 1 ~ 10 GHz 始终保持为负数。综上分析结果可得:当开口大小参数  $D$  为 0.75 mm 时,单元结构体的超材料性能为最佳。

为测试超材料单元结构体的频率选择特性,改变单元体外围空气腔在  $X$  轴方向上的平面为良磁体 (PMC) 边界,在  $Y$  轴方向上的平面为良导体 (PEC) 边界,在  $Z$  轴方向上为平面波传播方向,仿真运行可得到如图 5 的结果。可以得到超材料单元体的谐振频点在 11 GHz 处,且在 10.3 ~ 11.7 GHz,  $S_{11}$  的数值是小于 -10 dB 的,在此频段内电磁波是具有透射性,因此说明了该超材料单元体是具有频率选择特性的。

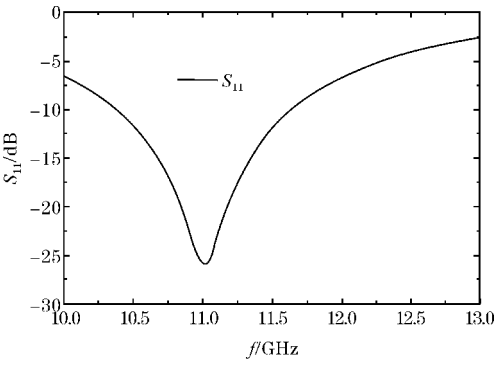
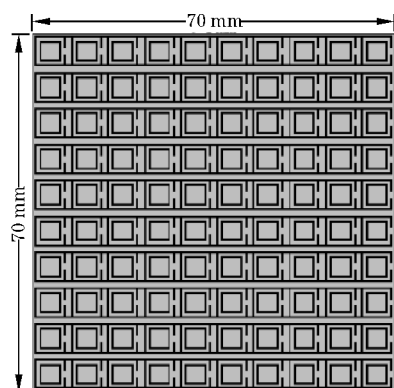


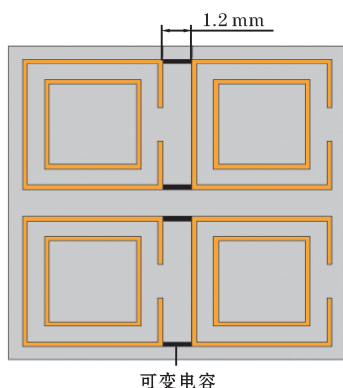
图 5 超材料单元体的  $S_{11}$  参数图

### 3 有源频率选择表面设计

设计的有源频率选择表面结构如图 6(a) 所示,由所设计的超材料单元结构体按 1.2 mm 的间隔周期排列为 10×10 阵列结构,总尺寸为 70 mm×70 mm×0.25 mm,并在相邻的两个单元结构体之间加载可变贴片电容。图 6(b) 为某一区域的 2×2 阵列结构放大图,图中在相邻两个超材料单元结构之间的矩形为加载的可变贴片电容有源器件,为实现可变贴片电容的电容值可调,利用超材料单元结构体的导电性,在处于阵列结构每一行的左右两端的单元体上分别焊接导线,并将其连接至外接直流电源设备上,通过改变直流电源的大小,达到改变电容值的目的。



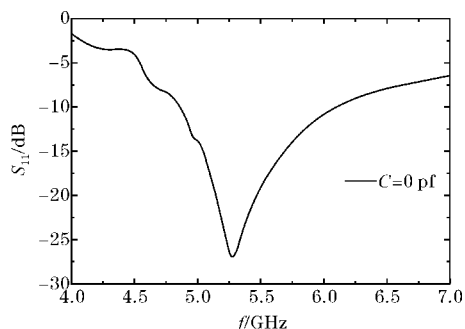
(a) 10×10 阵列结构图



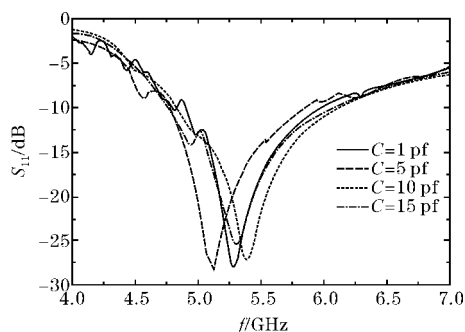
(b) 2×2 阵列结构图

图6 有源频率选择表面结构图

借助基于有限元的电磁仿真软件,设置外围空气腔在 $X$ 轴方向上的平面为良磁体(PMC)边界,在 $Y$ 轴方向上的平面为良导体(PEC)边界,在 $Z$ 轴方向上为



(a) 不加载可变电容



(b) 加载可变电容

图7 频率选择表面  $S_{11}$  参数图

平面波传播方向,此时可测试该有源频率选择表面的频率选择特性。

当不在频率选择表面加载可变贴片电容有源器件时,此时  $S_{11}$  参数曲线结果如图7(a)所示,可以得到其谐振频点为5.25 GHz,并在4.75 ~ 6.2 GHz是小于-10 dB的,说明此时的频率选择表面是无源的且频率选择具有不可调性。当在频率选择表面加载可变贴片电容有源器件时,结果如图7(b)所示,通过改变加载在可变电容两端的外接直流电源的大小,实现了调节可变电容的电容值,得到在5 ~ 5.5 GHz频率选择表面的谐振频点随着电容值的改变而改变,同时其通频带也随之而改变,说明此时的频率选择表面是有源的且频率选择具有可调性。

## 4 结论

设计了一种由10×10的方形单开口环超材料单元构成的周期阵列有源频率选择表面,其总尺寸为70 mm×70 mm×0.25 mm。方形单开口环超材料单元体能够在1 ~ 10 GHz保持介电常数和磁导率同时为负数,且折射率也小于0,证明了单元结构体具有超材料性能和频率选择特性。同时通过改变加载在频率选择表面的可变贴片电容两端的电压大小,实现了在5 ~ 5.5 GHz有源频率选择表面的谐振频率可调性。

## 参考文献:

- [1] B Munk. Frequency Selective Surface: Theory and Design [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 18(1): 94-94.
- [2] EA Parker, SB Savia. Active frequency selective surfaces with ferroelectric substrates [J]. IEE Proceedings-Microwaves, Antennas Propagation, 2002, 148(2): 103-108.
- [3] 陈谦,江建军. 有源频率选择表面研究进展及应用前景[J]. 电子元件与材料, 2012, (8): 80-86.
- [4] 贾宏燕,李田泽,杨淑连,等. 多功能有源频率选择表面[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(5): 537-540.
- [5] 廖章奇,聂彦,王鲜,等. 频率选择表面谐振特性在吸波材料中的应用[J]. 电子元件与材料, 2010, 29(6): 44-47.
- [6] TJ Cui, D Smith, R Liu. Metamaterials: Theory, design, and applications [M]. Berlin: Springer, 2009.
- [7] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterials and negative refractive index [J]. Science,

- 2004,305(5685):788-792.
- [8] 杜云峰,姜交来,廖俊生. 超材料的应用及制备技术研究进展[J]. 材料导报,2016,30(9):115-121.
- [9] 王蓬,李宝毅,赵亚丽. 超材料技术的研究进展[J]. 科技资讯,2014,12(21):98-99.
- [10] 周济. 超材料在电子元件中的应用[J]. 电子元件与材料,2008,27(9):1-4.
- [11] D Smith, WJ Padilla, DC Vier, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. Physical Review Letters, 2000,84(18):4184.
- [12] H Benosman, NB Hacene. Design and Simulation of Double "S" Shaped Metamaterial [J]. International Journal of Computer Science Issues, 2012,9(2).
- [13] A Mallik, S Kundu, MO Goni. Design of a novel two-rectangular U-shaped double negative metamaterial [J]. International Conference on Informatics, 2013:1-6.
- [14] SS Islam, MRI Faruque, MT Islam. Design of a New ENG Metamaterial for S-Band Microwave Applications [J]. Journal of Electrical & Electronics Engineering, 2014,7(2).
- [15] F. Ashraf, M. A. Ullah, M. S. Alam. Mathematical Characterization of Coupled Pi-shaped DNG Metamaterial Structure [J]. International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE), 2017,2(4):16-18.

## Design of Active Frequency Selective Surface based on Square Single Opening Ring Metamaterials

DENG Biao, TANG Tao, SHE Ying

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** An active frequency selective surface based on square single-opening ring metamaterials is designed which consists of  $10 \times 10$  square ring metamaterial elements. Each element size is  $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm}$  which is fabricated on FR4 substrate, and the single-ring square copper plate is mounted on the surface of the substrate. The element can maintain the dielectric constant and the permeability as well as the refractive index simultaneously negative at the range from 1 GHz to 10 GHz (L, S, C, X band). The derivation process of  $S$  parameter inversion method is reviewed. At the same time, the  $S$  parameter inversion method is employed to prove that the element is consistent with the properties of metamaterials. A variable chip capacitor is loaded between the metamaterial elements, and the resonant frequency adjustability of the active frequency selective surface is achieved by changing the magnitude of the voltage at the two ends of the capacitor.

**Keywords:** metamaterials; active frequency selective surface;  $s$  parameter inversion method; variable chip capacitor