

# 新型人工电磁材料天线罩技术研究

党涛<sup>1</sup>, 田殷<sup>2</sup>, 王光明<sup>1</sup>, 欧阳骏<sup>3</sup>

(1. 空军工程大学防空反导学院 西安 710051; 2. 四川九洲电器集团公司 四川 绵阳 621000; 3. 电子科技大学电子科学与工程学院 成都 611731)

**【摘要】**基于飞行器天线隐身的需求, 特别针对L波段机载宽带天线阵列隐身的具体要求, 需要设计一款工作在L波段的超薄且宽带的频率选择表面(FSS)隐身天线罩, 但由于天线工作频率较低, 且带宽宽, 使得传统设计方法设计的频率选择表面天线罩厚度较厚难以具备真正的工程应用价值。该文从宽带和低剖面两个关键角度出发, 提出了一种正交分离式新型金属条电感层及方环电容层的亚波长级联结构并结合磁性材料加载的FSS策略, 基于全局优化的遗传算法优化设计, 实现了宽带低剖面的频率选择表面设计的隐形天线罩, 通过理论分析和实际设计制作, 最终设计厚度仅为 $0.035\lambda$ , 相对带宽达到28.6%。

**关键词** 宽带低剖面; 频率选择表面(FSS); 遗传算法; 磁性材料; 天线罩

中图分类号 TN82 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2018.05.008

## Research on a New Type of Artificial Electromagnetic Material Radome

DANG Tao<sup>1</sup>, TIAN Yin<sup>2</sup>, WANG Guang-ming<sup>1</sup>, and OUYANG Jun<sup>3</sup>

(1. Aeronautical Antimissile Institute of Air Force Engineering University Xi'an 710051;

2. Sichuan Jiuzhou Electric Group Co. Ltd Mianyang Sichuan 621000;

3. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

**Abstract** Aiming at the requirement of stealth aircraft antenna, especially the specification for L-band broadband antenna array, it is needed to design a stealth radome with ultra-thin and wideband frequency selectivity surface (FSS) for working in L-band. Due to the low working frequency and wide bandwidth, the traditional design method will make the radome thickness thicker, which is hard to apply in practice. Taking broadband and low profile into consideration, this paper proposes a cascade sub-wavelength structure based on new orthogonal separation metal strip inductance layer, square ring capacitance layer and magnetic materials. At last, a broadband and low profile FSS with  $0.035\lambda$  thickness of and 28.6% relative bandwidth is designed by means of genetic algorithm.

**Key words** broadband and low profile; frequency selective surface; GA; magnetic material; radome

借助于计算机的建模仿真算法合相关软件及近年来逐步发展的多层FSS的制作工艺, 通过各种不同的FSS单元的变形, 设计出了大量更具特色的FSS单元, 如高品质因数、高矩形系数、双多频段等。最具代表性如文献[1], 在美国Wright-Patterson空军基地航空电子实验室的资助下, 相关研究人员在基础理论研究或是FSS的实际应用研究中, 都有着较为丰富的理论拓展和杰出的工程成果。文献[2]在20世纪80年代, 经过数十年的积累, 在周期FSS结构的数值分析方法上取得突破性进展, 率先提出了一种分析FSS的全波方法(谱域法), 至今还被广泛使用于FSS的全波分析中。其团队成员在随后的二十多年研究中, 将改全波分析方法进一步拓展, 用于分析多层

级联且具有不同周期的平面FSS。同时, 在Marconi防卫系统有限公司和英国科学与工程委员会的资助下, 大量研究人员对FSS做了长期深入的研究, 文献[3-6]给出了非常具有工程应用价值的单元形状的各种等效电路模型, 同时对构成FSS的诸多参变量对其频率响应特性的影响进行过多方面的讨论。文献[7-8]将分形几何结构应用在FSS设计中, 并在此基础上引入了一些优化算法, 获得一系列具有高性能的FSS特殊单元。而在近几年有关FSS的研究中, 也有许多关于新型FSS的研究, 其在结构和性能上进行了不少优化工作, 文献[9]把基片集成波导技术应用到了FSS的设计中, 通过在级联的多层FSS之间设计金属化通孔, 从而较为有效地提高了通带矩形系数和该

类FSS的带外抑制。也有一些研究成果显示了将有源器件应用在FSS中,用于提升FSS入射角稳定性和交叉极化特性等,也有专注于实现宽入射角入射的,以及利用FSS设计方法设计形可调的新型吸波结构体。

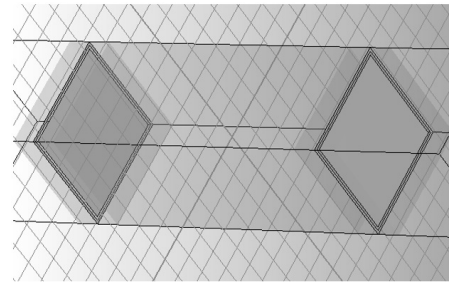
前人在FSS的设计工作方面取得了不少有代表性的创新成果。但纵观国内外研究进展,专门针对宽通带及低剖面的低频段FSS设计鲜有报道,就其原因是宽带和低剖面的矛盾问题。本文针对该类问题,从宽带和低剖面两个关键角度出发,提出了一种正交分离式新型金属条电感层及方环电容层亚波长级联结构并结合磁性材料加载的FSS,最终设计厚度仅为 $0.035\lambda$ ,且相对带宽达到了28.6%。

### 1 基本原理

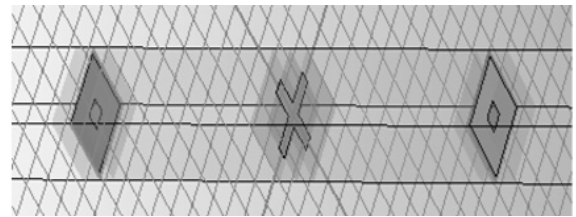
利用传统方法设计带通FSS,往往通过设计一种利用谐振结构组成的级联网络,其设计的单元本身处于谐振工作模式,其谐振频率就是FSS的工作频率。谐振型单元结构较为简单,但是由于高次模的存在,随着频率的不断升高,其阻带特性中往往出现很多毛刺,会被高阶的谐振模式或者栅瓣破坏,在高频段出现较多的寄生通带,因此利用谐振型的FSS单元设计宽阻带FSS存在天然缺陷。

近年来,相关文献陆续报道了一种利用级联结构形成通带的FSS结构,称之为非谐振型级联结构FSS。此类FSS的工作原理完全不同于前面描述的谐振型FSS。一般情况下,在工作要求频段内,其电容层和电感层自身均不会发生谐振,其结构尺寸也远远小于谐振尺寸,同时每层单元的周期也远远小于工作波长,通常只有工作波长的十五分之一左右,其工作方式是通过级联的结构共同作用实现谐振,可以实现在很宽的频带范围内不出现高阶谐振模式。

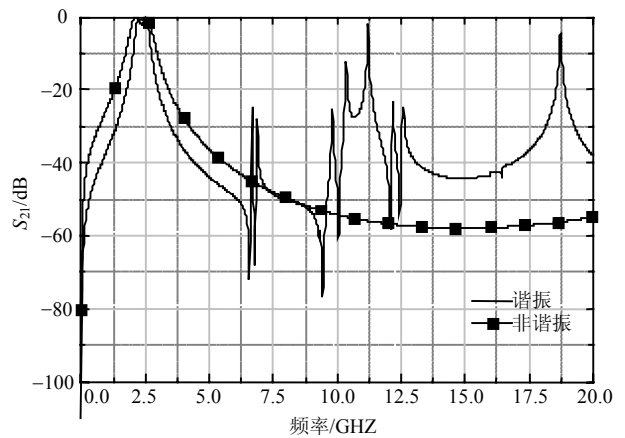
图1为两种不同的类型结构的对比,图1a为谐振型FSS,设计的中心频率为4 GHz,图1b为非谐振型级联单元,设计中心频率3 GHz,周期 $\lambda_0/50$ ,其仿真结果对比为图1c,可以看出,非谐振级联结构的FSS具有较为理想的宽带高次模抑制效果。



a. 谐振型级联单元

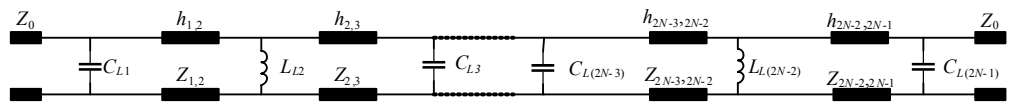


b. 非谐振型级联单元

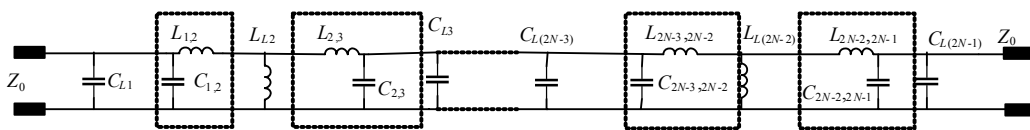


c. 两种单元传输响应对比

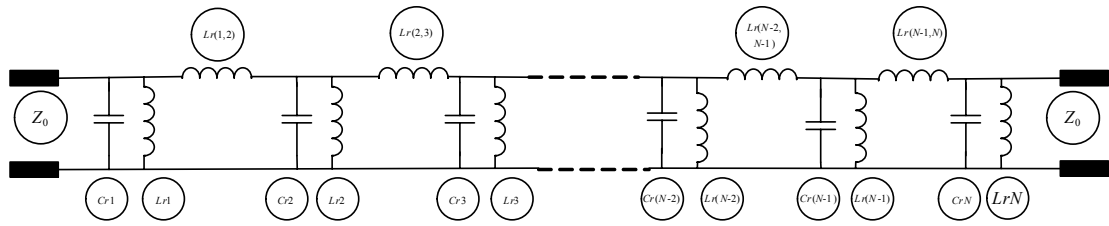
图1 两种单元结构及传输响应对比



a. 介质层则等效为传输线结构

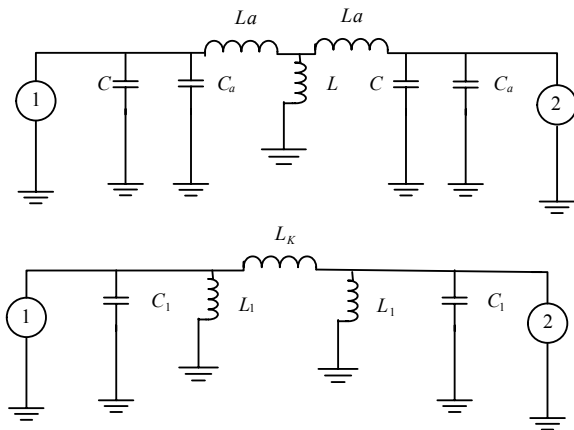


b. 等效电路模型

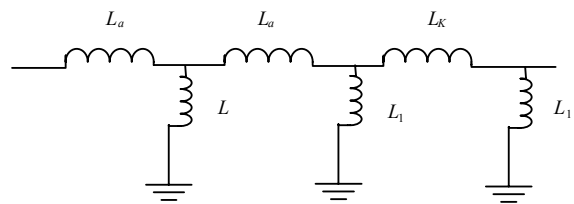


c. 变换后的等效电路模型

图2 非谐振型级联单元物理结构及其等效电路



a. 等效电路



b. 网络变换关系

图3 非谐振型级联单元二阶带通响应等效电路及网络变换

非谐振单元有电感层、电容层和介质基板3部分, 电感层由金属网栅组成, 金属贴片形成了电容层, 介质基板分开了金属贴片和金属网栅层, 并依次纵向排布形成级联结构; 介质层则可以等效为传输线, 其等效模型如图2a所示。由于传输线可以用等效分布参数来等效描述, 当传输线长度小于 $\lambda/12$ 时, 可以将传输线的分布参数模型简化为一个串联电感和一个并联电容, 如图2b所示。为分析方便, 将T网络变换成为 $\pi$ 型网络, 得到高阶带通响应模型, 如图2c所示。若为二阶带通响应, 等效网络变换可以简化为图3, 等效电路变换公式如式(1)~式(4):

$$L_1 = L_a + 2L \tag{1}$$

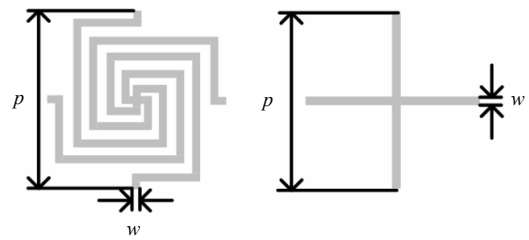
$$L_k = \frac{L_a^2}{L} + 2L_a \tag{2}$$

$$C_1 = C + C_a \tag{3}$$

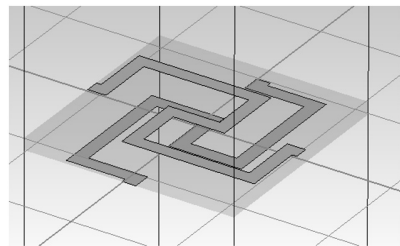
$$L_a = \mu_0 u_r h \tag{4}$$

## 2 新型宽带低剖面FSS设计

### 2.1 宽带设计



a. 原理结构



b. 实际结构(x、y方向分离的电感层)

图4 螺旋曲折线电感层

根据相关的滤波器理论, 图3所示的二阶带通滤波器的带宽将正比 $\sqrt{L_1/C_1}$ , 本文为了实现宽带频率响应, 从公式上分析, 需要加大并联电感 $L_1$ 或者降低电容 $C_1$ 。对于传统的十字网栅电感层, 则可以通过有效延长电流路径, 即通过螺旋蜿蜒曲折线的形式, 加大电感层的感性效应, 同时需要注意控制单元尺寸避免发生单元自身谐振从而抑制高阶模式或栅瓣出现。图4为提出的螺旋曲折线电感层结构, 从仿真结果可以得到, 在相同的周期及线宽条件下, 螺旋曲折线电感层可以在相同有效面积的前提下提升电感层等效电感(当 $p=2.06 \text{ mm}$ ,  $w=0.11 \text{ mm}$ , 螺旋曲折线的等效电感为 $2.84 \text{ nH}$ , 而十字网栅仅仅为 $1.02 \text{ nH}$ )。同时, 本文还提出用两个方向相互正交的分离的金属条带代替之前的平面螺旋电感层, 如图4b所示。

为抑制阵列干涉的影响, 本文将传统贴片单元修改为方环单元, 主要原因是环单元为传统带阻型单元, 设计将方环单元的频率响应极点置于阵列干

涉点处,可以有效抑制由阵列干涉造成的窄传输峰。其整体物理结构如图5所示。

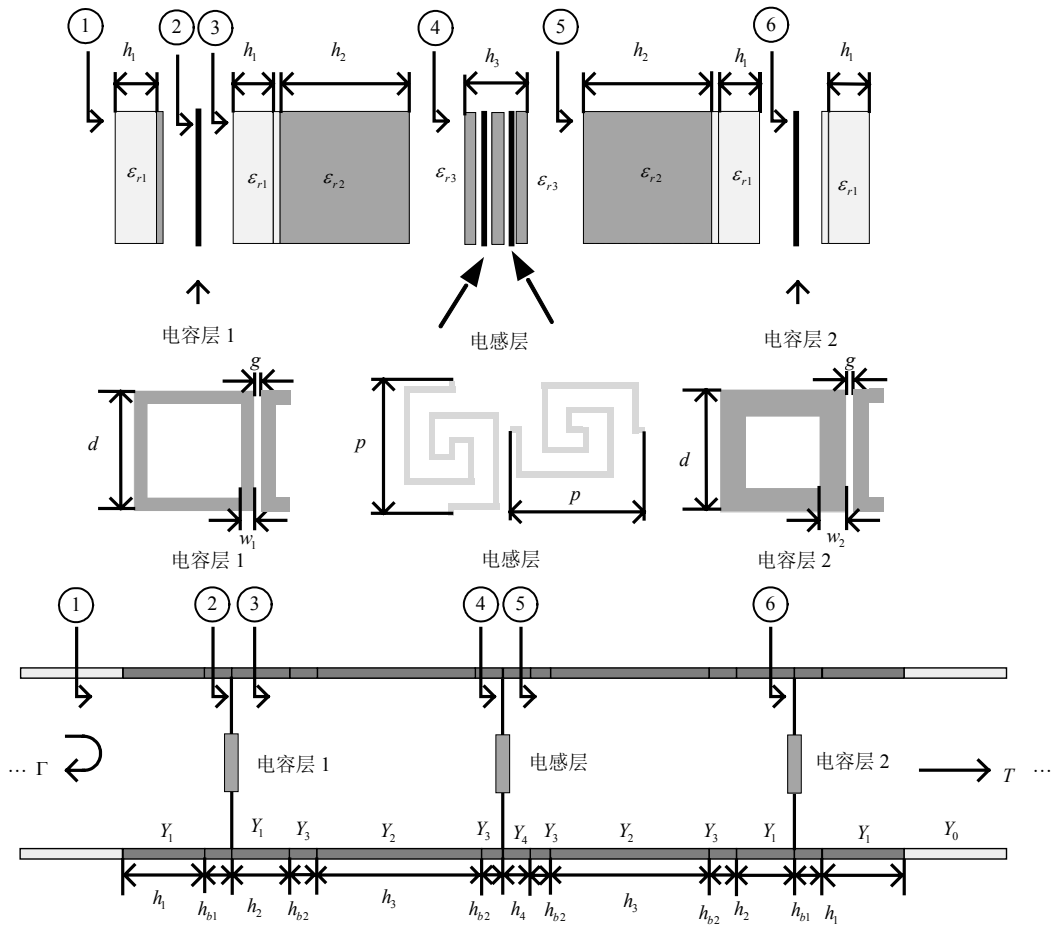


图5 新型宽带非谐振型级联结构FSS

### 2.2 优化算法集成

由于传统理论的经验公式难以全局性的考察FSS的频率响应,本文在此引入优化算法,设计出具有实际工程意义的通带和阻带特性,对级联结构的参数进行优化,尽量扩大各个参数的搜索区间以避免出现局部收敛的问题。

为满足工程加工实现的要求,设计的非谐振级联FSS结构中中介层的介电常数以及厚度需要根据实际加工实现能力进行量化,比如采用前后对称的方式等。但是由于级联结构复杂,传统的全波分析算法需要花费巨大的计算开销,特别是当优化参数较多的情况下,降低非谐振型级联结构的设计效率。

本文针对上述问题,使用遗传算法(genetic algorithm)进行优化设计。为加快求解速度和节省计算资源,采用上述等效电路模型求解级联结构的S参数,再将计算所得的S参数代回到遗传算法之中,进行个体优化,进而得到设定的优化区间内的最优值。需要全波仿真的频率响应计算模型用等效电路模型及相应的等效元件计算公式代替,设计了一个

较为准确求解频率响应曲线的求解器,再将这个求解器嵌入到遗传算法之中实现整个结构的优化。

本文的优化目标包括通带内插入损耗、带宽、过渡带宽度和阻带抑制等。此外,为满足低剖面要求,物理厚度也设计在适应度函数之中。

以正入射为例,TE和TM极化波分别入射时的优化目标设置如下:

- 1) 通带内, TE和TM插损均值<0.2 dB;
- 2) 通带内, TE和TM幅度响应一致;
- 3) 阻带内, TE和TM带外抑制>20 dB;

对于遗传算法,适应度函数的设计最为关键。本文的适应度函数由上述3个部分的函数组成。通带适应度函数具体设置见式(5)~式(8),其中:Mag表示幅度,Phase表示相位,PN<sub>1</sub>表示S参数中通带起始频率编号,PN<sub>2</sub>表示S参数中通带终止频率编号,

Passgate<sub>TE</sub>表示TE通带插损,Passgate<sub>TM</sub>表示TM通带插损,w<sub>1</sub>表示幅度加权因子,w<sub>2</sub>表示相位加权因子,w<sub>3</sub>表示TE插入损耗加权因子,w<sub>4</sub>表示TM插入损耗加权因子。

阻带适应度函数设置见式(7), 其中:  $\text{Stopate}_{\text{TE}}$  表示TE阻带带外抑制最低门限,  $\text{Stopate}_{\text{TM}}$  表示TM阻带带外抑制最低门限,  $w_5$  表示TE阻带带外抑制加权因子,  $w_6$  表示TM阻带带外抑制加权因子。

通过比较研究, 本文取  $w_1=2$ ,  $w_2=0$ ,  $w_3=w_4=4$ ,  $w_5=w_6=2$  (由于本文只设计线极化工作时, 对TE和TM相位一致性没有特殊要求, 故  $w_2=0$ )。最终适应度函数表示为式(8)。

$$V_1 = w_1 \frac{\sum_{\text{PN}_1}^{\text{PN}_2} |\text{Mag}(S_{21_{\text{TE}}}) - \text{Mag}(S_{21_{\text{TM}}})|}{\sum_{\text{PN}_1}^{\text{PN}_2} |\text{Mag}(S_{21_{\text{TE}}})|} +$$

$$w_2 \frac{\sum_{\text{PN}_1}^{\text{PN}_2} |\text{Phase}(S_{21_{\text{TE}}}) - \text{Phase}(S_{21_{\text{TM}}})|}{\sum_{\text{PN}_1}^{\text{PN}_2} |\text{Phase}(S_{21_{\text{TE}}})|} \quad (5)$$

$$V_2 = w_3 \frac{\sum_{\text{PN}_1}^{\text{PN}_2} |\text{Mag}(S_{21_{\text{TE}}}) - \text{Passgate}_{\text{TE}}|}{\sum_{\text{PN}_1}^{\text{PN}_2} |\text{Passgate}_{\text{TE}}|} +$$

$$w_4 \frac{\sum_{\text{PN}_1}^{\text{PN}_2} |\text{Mag}(S_{21_{\text{TM}}}) - \text{Passgate}_{\text{TM}}|}{\sum_{\text{PN}_1}^{\text{PN}_2} |\text{Passgate}_{\text{TM}}|} \quad (6)$$

$$V_3 = w_5 \frac{\sum_{\text{PN}_1}^{\text{PN}_2} |\text{Mag}(S_{21_{\text{TE}}}) - \text{Stopgate}_{\text{TE}}|}{\sum_{\text{PN}_1}^{\text{PN}_2} |\text{Stopgate}_{\text{TE}}|} +$$

$$w_6 \frac{\sum_{\text{PN}_1}^{\text{PN}_2} |\text{Mag}(S_{21_{\text{TM}}}) - \text{Stopgate}_{\text{TM}}|}{\sum_{\text{PN}_1}^{\text{PN}_2} |\text{Stopgate}_{\text{TM}}|} \quad (7)$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (8)$$

遗传算法中基本参数设置为: 交叉概率0.8, 变异概率0.01, 种群大小80, 最大进化代数600。

对上述结构进行优化, 得到如下物理结构和仿真结果如表1所示, 中间层介质为相对介电常数为10.2的介质基板, 最外层介质相对介电常数为1.1, 最内层为相对介电常数2.2的Rogers 5880。总厚度为21.87 mm, 对应中心频率电厚度为  $0.0763\lambda_0$ 。

表1 新型FSS单元结构的物理参数

参数	数值/mm	参数	数值
$p$	6.06	$\epsilon_{r1}$	10.2
$d$	5.94	$\epsilon_{r2}$	1.1
$w_1$	1.7	$\epsilon_{r3}$	2.2
$w_2$	2.04	$h_1$	0.635/mm
$g$	0.12	$h_2$	9.2/mm
$w$	0.16	$h_3$	0.254/mm

### 2.3 厚度缩减

现有的仿真结果, 尽管电厚度较小, 但是远远

达不到实际工程需求, 减小厚度, 会加大通带带内插入损耗。为了降低谐振频率, 需要加大并联  $L_1$ , 为了降低二阶带通响应通带内的插损, 需要加大耦合电感  $L_K$ 。这些需求都需要有较大的分布电感  $L_a$ , 在材料没有磁性的情况下 ( $u_r=1$ ), 需要较大的介质层厚度才能获得所需大小的分布电感  $L_a$ , 因此整体厚度较厚。但是如果材料有磁性, 即  $u_r > 1$ , 则获得同样大小的分布电感  $L_a$  时, 可有效缩减介质层的厚度, 达到降低剖面的效果。将电感层置于磁性材料两侧, 磁性材料的电磁参数如表2所示, 频选效果如图6所示, 实物图片如图7所示。

可以看出随入射角加大, TE极化通带轻微上偏, 大入射角度下通带插损加大。在2~18 GHz阻带频率范围, TE极化阻带抑制良好。对TM极化波而言, 随入射角加大, 其矩形系数降低, 带外抑制变差。但总体而言, 通过上述技术手段, 实现了宽带低剖面的频率选择表面设计, 最终设计厚度仅为  $0.035\lambda$ , 相对带宽达到28.6%。

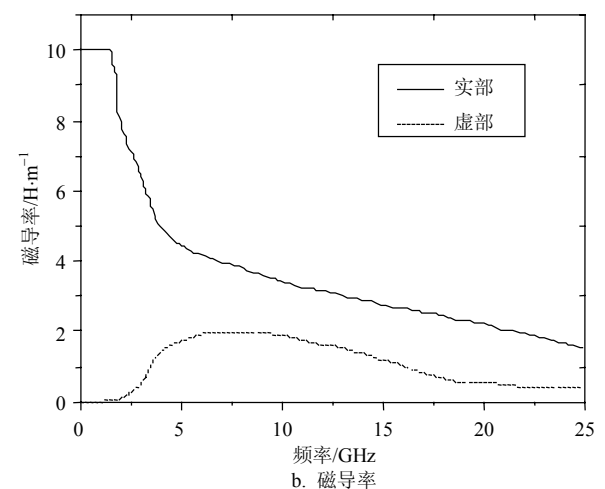
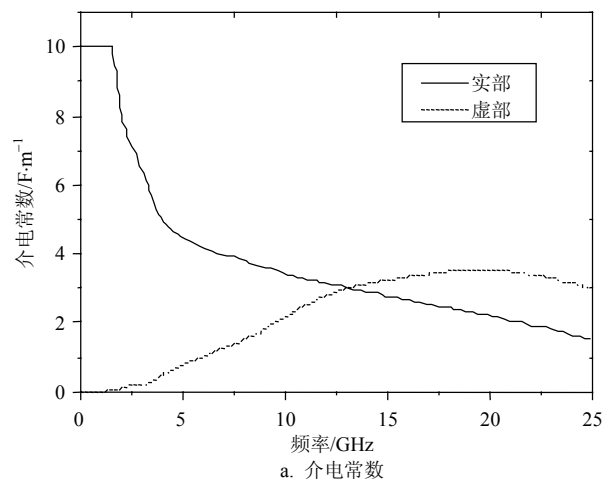


图6 磁性材料的电磁参数

表2 新型磁材料加载后FSS单元结构的物理参数

参数	数值/mm	参数	数值
$p$	3.4	$\epsilon_{r1}$	10.2
$d$	3.3	$\epsilon_{r2}$	1.1
$w_1$	1.2	$h_1$	0.635/mm
$w_2$	1.4	$h_2$	2/mm
$g$	0.1	$h_3$	0.8/mm
$w$	0.74		

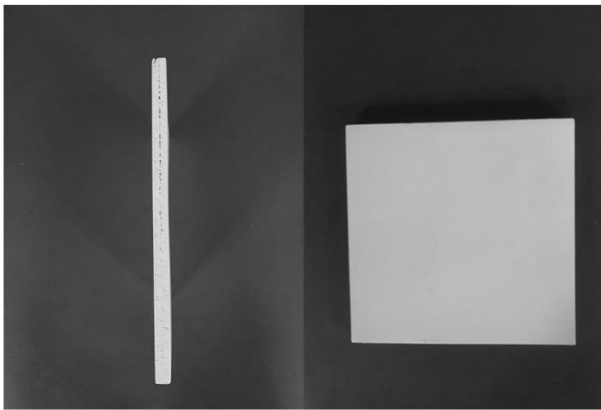


图7 FSS加工实物图

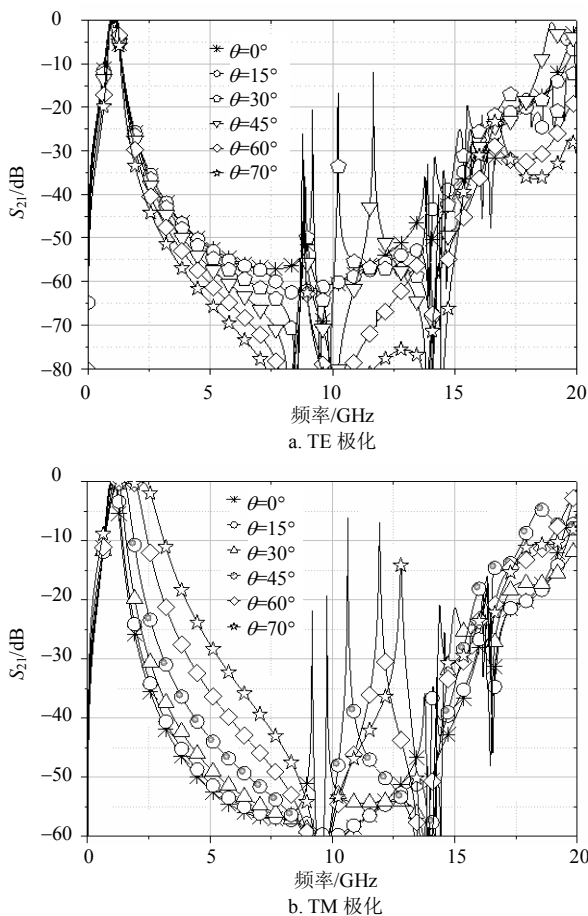


图8 加载有磁性材料FSS

### 3 结束语

本文围绕低剖面宽频带频率选择表面设计这一主要问题, 提出了一种正交分离式新型金属条电感层及方环电容层亚波长级结构并结合磁性材料加载的FSS设计策略, 并在此基础上利用了遗传算法进行优化, 设计了一款工作在L波段的厚度仅为 $0.035\lambda$ , 相对带宽28.6%的频率选择表面, 该设计方法是一种能同时兼顾宽带和低剖面的设计方法。

### 参 考 文 献

- [1] MUNK B A. Frequency selective surfaces – theory and design[M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 2000.
- [2] MITTRA R, HALL R, TSAO C H. Spectral-domain analysis of circular patch frequency selective surfaces [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1984, 32(5): 533-536.
- [3] LANGLEY R J, PARKER E A. Double square frequency selective surfaces and their equivalent circuit[J]. Electronics Letters, 1983, 19(17): 675-677.
- [4] LANGLEY R J, PARKER E A. Equivalent circuit model for arrays of square loops[J]. Electronics Letters, 1982, 18(7): 294-296.
- [5] BUKHAIR S S, WHITOW W G, VARDAXOGLU J C, et al. Dipole-slot-dipole metasurfaces[J]. IET Microwaves, Antenna & Propagation, 2016, 10(13): 1384-1389.
- [6] BUKHAIR S S, WHITOW W G, VARDAXOGLU J C, et al. Dipole and slot loaded closely coupled complementary metasurfaces[C]//2015 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC). [S.l.]: IEEE, 2015: 1-3.
- [7] PANWAR R, PUTHUCHERI S, AGARWALA V, et al. Effect of particle size on radar wave absorption of fractal frequency selective surface loaded multilayered structures[C]//2014 IEEE International Microwave and RF Conference (IMaRC). [S.l.]: IEEE, 2014: 186-189
- [8] PANWAR R, PUTHUCHERI S, AGARWALA V, et al. Fractal frequency-selective surface embedded thin broadband microwave absorber coatings using heterogeneous composites[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63(8): 2438-2448.
- [9] LUO G Q, HONG W, TANG H J, et al. High performance frequency selective surface using cascading substrate integrated waveguide cavities[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2006, 16(12): 648-650.
- [10] 刘宇恒. 带通型宽阻带及圆极化频率选择表面技术研究 [D]. 电子科技大学, 2017.  
LIU Yu-heng. Technology study of bandpass frequency selective surface with wideband rejection performance and circularly polarized operation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2017.