

# 圆环单元 FSS 对改善吸波体雷达吸波特性的影响

汪剑波, 肖洪亮, 陈桂波, 陈新邑, 孙贯成, 卢俊

(长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 设计了圆环单元的频率选择表面(FSS)结构,并将该结构置于吸波材料中构成了复合吸波结构。利用谱域法对该结构进行数值模拟,计算出频率为2~16 GHz微波波段的反射系数,并研究了圆环单元尺寸和排布周期对其吸波特性的影响。结果表明:当圆环单元FSS的单元间距为10 mm,单元尺寸为3.3 mm时,其共振频率的反射率由-8.15 dB降低为-14.54 dB,-5 dB吸波带宽由1.2 GHz拓展为3.05 GHz;且随圆环单元尺寸增大,共振反射率增加;随单元排列周期增加,吸波材料带宽增大。结果表明,利用FSS可以明显改善吸波材料涂层的吸波性能,通过调整相关参数可以获得所需的复合吸波结构,拓展FSS在吸波材料中的应用范围。

**关键词:** 频率选择表面;吸波材料;谱域法;吸波带宽

**中图分类号:** TB34; O451 **文献标识码:** A

## Influence of ring FSS on improving characteristics of radar absorbing materials

WANG Jian-bo, XIAO Hong-liang, CHEN Gui-bo, CHEN Xin-yi, SUN Guan-cheng, LU Jun

(School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A ring-unit FSS is designed and put into absorbing materials to form the composite FSS absorbing structure, then the structure is numerically simulated through the spectral domain approach. The reflection coefficient of the structure at a microwave band in 2 – 16 GHz is calculated and the influence of ring-unit's sizes and aligning cycles on absorbing characteristics is studied. The results show that when the ring-unit FSS's unit spacing is 10 mm and unit size is 3.3 mm, the resonance frequency reflectivity decreases from -8.15 dB to -14.5 dB, and the absorbing band with whose reflectivity is larger than -5 dB broadens from 1.2 GHz to 3.05 GHz. Meanwhile, the resonance frequency reflectivity increases with the increasing of ring-unit size, and the absorbing material's bandwidth expands with the expansion of unit aligning cycles. Experimental results indicate that the FSS can be used in absorbing materials to improve its absorbing properties. Moreover, the required composite FSS absorbing structure can be obtained by adjusting the corresponding parameters, which expands the application scope of FSS in absorbing materials.

**Key words:** Frequency Selective Surface (FSS); absorbing material; spectral domain approach; absorbing bandwidth

## 1 引言

隐身技术是实现兵器突防、提高作战效能的有效手段,其中实现飞行器对探测雷达波隐身仍是需要首先解决的问题。在飞机、巡航导弹等飞行器非透明件上使用雷达吸波材料是实现隐身的一种有效方法。

吸波材料是指能吸收和衰减入射的电磁波,并将电磁能转化为热能后耗散的材料。采用吸波材料来降低目标的雷达散射截面(RCS)是对现代军事目标进行雷达隐身的重要技术之一。在雷达吸波材料的研究中,厚度薄、质量轻、吸收频带宽、吸波能力强的材料是发展的趋势<sup>[1]</sup>。目前,研究人员已提出了多种方法来实现此目的,在吸波材料中使用频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)就是方法之一<sup>[2~4]</sup>。

FSS 是一种二维周期性结构,由大量的金属贴片或孔径单元组成,与电磁波相互作用可表现出空间滤波器的功能<sup>[5,6]</sup>。当将 FSS 与隐身吸波材料结合时,可以提高吸波材料的吸波性能<sup>[7]</sup>。由于 FSS 的特性与单元形式、排布周期及电磁波的极化等因素有关,因此,这些因素也将决定 FSS 对复合吸波材料性能的影响。本文从构成 FSS 的结构周期出发,设计了环形单元 FSS,利用谱域法

对含有这种 FSS 的吸波材料性能进行仿真,研究了 FSS 单元周期对吸波材料的吸波性能的影响规律,为 FSS 在吸波材料中的应用提供了设计依据。

## 2 谱域法

FSS 分析方法有多种,本文采用谱域法对含有 FSS 的吸波结构进行分析。

设  $\mathbf{M}$  是入射电磁场在单元中引起的等效磁流密度,则场点  $\mathbf{r}$  处的散射磁场可表示为:

$$\mathbf{H}^s = -j\omega\varepsilon_0\mathbf{F} + \frac{1}{j\omega\mu_0}\nabla(\nabla\cdot\mathbf{F}), \quad (1)$$

其中:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \int \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')\mathbf{M}(\mathbf{r}')d\mathbf{r}' = \mathbf{G} * \mathbf{M}, \quad (2)$$

$\mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  为自由空间格林函数,且:

$$\mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{\exp(-jk_0|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}, \quad (3)$$

$\mathbf{r}'$  为源点,星号表示卷积运算,  $k_0$  为自由空间波数。

根据电磁场边界条件,在单元中的切向磁场连续,并应用傅里叶变换可获得单个单元中的磁场谱域积分方程。由于 FSS 是二维周期无限大阵列结构,满足 Floquet 定理,因此,可求得 FSS 无限大周期阵列结构的入射切向磁场:

$$-\begin{vmatrix} H_x^{\text{inc}}(x, y) \\ H_y^{\text{inc}}(x, y) \end{vmatrix} = \frac{4\pi}{j\omega\mu_0 D_x D_y} \cdot$$

$$\sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha_{mn}^2 & -\alpha_{mn}\beta_{mn} \\ -\alpha_{mn}\beta_{mn} & k_0^2 - \beta_{mn}^2 \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{G}}\mathbf{D}(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \begin{bmatrix} \tilde{M}_x(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \\ \tilde{M}_y(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \end{bmatrix} e^{j\alpha_{mn}x} e^{j\beta_{mn}y}, \quad (4)$$

其中:  $\alpha_{mn} = \frac{2m\pi}{D_x} + k_x^{\text{inc}}$ ,  $\beta_{mn} = \frac{2n\pi}{D_x \sin\Omega} - \frac{2m\pi}{D_x} \cot\Omega +$

$k_y^{\text{inc}}$ ,  $\Omega$  为 FSS 两个周期方向的夹角,  $D_x$ 、 $D_y$  为 FSS 二维方向的周期,  $\alpha_{mn}$ 、 $\beta_{mn}$  为二维方向上的切向波数。使用矩量法求解方程(4)可获得等效磁流  $\mathbf{M}$  分布,即可获得用  $\mathbf{M}$  表示的反射场和传输场。将式(3)的格林函数中自由空间的波数换成介质中波数,同样可求出有衬底 FSS 的切向磁场。本文在利用矩量法求解方程(4)时选取屋顶子域函数

为基函数。

## 3 仿真结果

### 3.1 吸波材料及特性

吸波材料的性能主要通过涂敷吸波材料的金属平板对电磁波的反射来表征。本文采用三层雷达吸波材料<sup>[8]</sup>,其具体参数如表 1 所示。

表1 双层雷达吸波材料参数

Tab.1 Parameters of bi-layer radar absorbing materials

层序	厚度/mm	复介电常数	复磁导率
1	0.5	$5.91 - 2.41j$	$1.04 - 0.04j$
2	1.5	$20.60 - 3.07j$	$1.13 - 0.87j$
3	3	1.07	无

利用谱域法对吸波体进行仿真,结果(TE 极化波  $0^\circ$  入射)如图 1 所示。可见,双层雷达吸波材料的共振频率为 4.2 GHz, 反射率为  $-8.15$  dB,  $-5$  dB 带宽为 1.2 GHz。

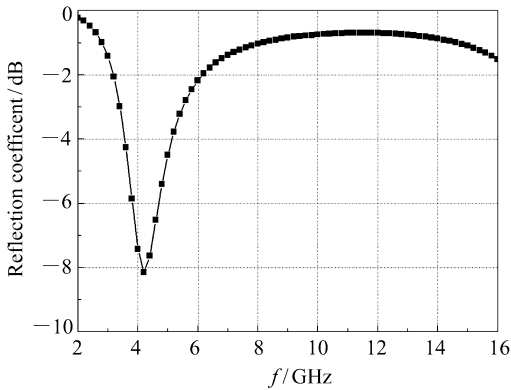


图1 吸波材料吸波特性

Fig.1 Absorbing characteristics of absorbing materials

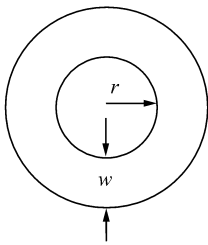


图2 环孔单元 FSS 结构

Fig.2 Ring-unit FSS structure

本文设计了一种环孔单元的金属周期性 FSS

结构,其单元内半径  $r = 3.3$  mm, 缝宽  $w = 0.6$  mm, 单元按正方形排列,周期为 10 mm, 中心频率为 13.5 GHz, 如图 2 所示。将所设计的 FSS 与吸波材料组合成复合结构,如图 3 所示。

吸波介质 2
吸波介质 1
FSS
衬底
PEC

图3 FSS 复合吸波结构

Fig.3 Composite FSS absorbing structure

利用谱域法对 FSS 复合方式分别进行了吸波特性仿真, FSS 复合吸波结构与吸波材料的反射特性对比曲线如图 4 所示; 它们的共振频率、共振频率反射率和  $-5$  dB 带宽的对比见表 2。

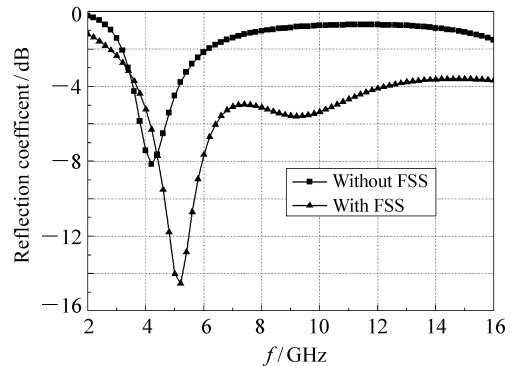


图4 FSS 复合吸波结构特性与吸波材料特性对比  
Fig.4 Correlation curve of composite FSS absorbing structure with characteristics of absorbing materials

从图 4 可以看出,与单纯吸波材料相比,加载 FSS 共振频率向高频方向漂移, 5.2 GHz 位置处出现最强吸收, 但共振反射率和吸收带宽都有显著提高,  $-5$  dB 处吸收带宽由 1.2 GHz 增加到 3.05 GHz。

表2 FSS 复合吸波结构与吸波材料特性的对比

Tab.2 Correlation of composite FSS absorbing structure with characteristics of absorbing materials

	共振频率/GHz	共振频率反射率/dB	$-5$ dB 带宽/GHz
吸波材料	4.2	$-8.15$	1.2
FSS 复合吸波结构	5.2	$-14.54$	3.05

### 3.2 FSS 单元尺寸对吸波材料吸波特性的影响

通过改变环孔尺寸进行共振频率调节,其复合吸波材料的反射特性对比曲线如图 5 所示,其

共振频率、共振频率反射率及  $-5$  dB 带宽对比结果如表 3 所示。

表 3 FSS 复合吸波结构的反射特性随单元尺寸的变化

Tab.3 Changes of reflectivities of composite FSS absorbing structure with unit sizes

环孔半径/mm	共振频率/GHz	共振频率反射率/dB	$-5$ dB 带宽/GHz
2.7	5.8	-13.83	3.8
3.0	5.4	-14.12	3.59
3.3	5.2	-14.54	3.05
3.6	4.8	-14.97	2.77

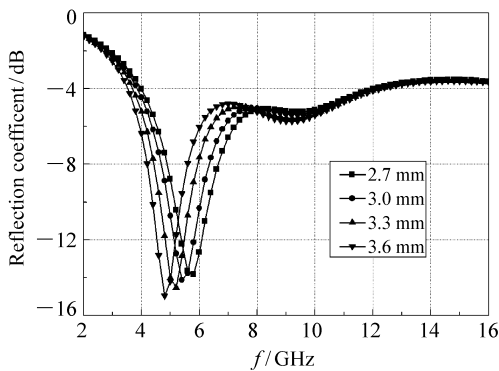


图 5 FSS 复合吸波结构的反射特性随单元尺寸变化对比

Fig. 5 Reflectivities of composite FSS absorbing structure with different unit sizes

由此可见,随环孔半径的增加,吸波结构的共振频率向低频漂移,共振频率反射率增加,相应地  $-5$  dB 带宽减小,但仍明显优于单纯吸波材料。

### 3.3 FSS 排布周期对吸波材料吸波特性的影响

通过改变单元周期进行共振频率调节,其复合吸波材料的反射特性对比曲线如图 6 所示,其

共振频率、共振频率反射率及  $-7$  dB 带宽对比结果如表 4 所示。

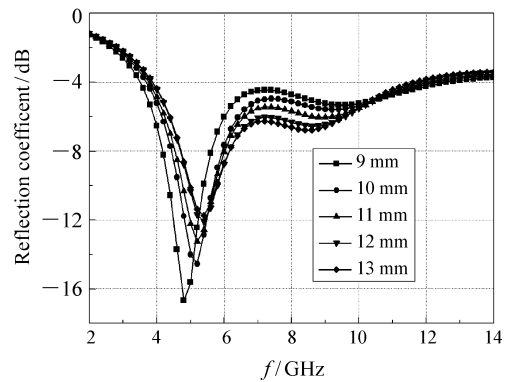


图 6 FSS 复合吸波结构的反射特性随单元周期变化对比

Fig. 6 Reflectivities of composite FSS absorbing structure with different unit cycles

可见,随单元周期的增加,吸波结构的共振频率向高频漂移,共振频率反射率降低,相应地  $-7$  dB 带宽略有增加。

表 4 FSS 复合吸波结构的反射特性随单元周期的变化

Tab.4 Changes of reflectivities of composite FSS absorbing structure with unit cycles

周期间距/mm	共振频率/GHz	共振频率反射率/dB	$-7$ dB 带宽/GHz
9	4.8	-16.67	1.7
10	5.2	-14.54	1.84
11	5.2	-13.25	1.84
12	5.4	-12.08	1.88
13	5.4	-11.72	1.89

## 4 结 论

本文研究了 FSS 结构对吸波材料吸波特性的影响,并设计了环孔单元 FSS。利用谱域法对 FSS 复合吸波结构的特性进行了仿真研究,并与雷达吸波材料的特性进行了对比,给出了单元尺寸和单元周期对同一材料吸波特性的影响规律。结果

表明,利用 FSS 可以明显改善吸波材料涂层的吸波性能,拓展涂层的吸波带宽;增加圆环单元尺寸有利于提高共振反射率,但吸收带宽相应缩小;增加单元排布周期有利于增加吸收带宽,但吸收强度降低。总之,利用 FSS 可以明显改善吸波材料涂层的吸波性能,为进一步提高吸波材料的低频吸波性能提供了一种切实可行的途径。

## 参考文献:

- [1] 袁承勋,周忠祥,秦汝虎,等. 实现轻、薄、宽涂层吸波材料的技术途径[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(6):956-959.  
YUAN CH X,ZHOU ZH X,QIN R H,*et al.*. Technical approach to obtain light, thin and broadband coated RAM[J]. *J. Harbin Institute Technol.*,2007,39(6):956-959. (in Chinese)
- [2] 张朝发,李焕喜,吕明云. 吸波材料与 FSS 复合的隐身技术研究进展[J]. 材料导报,2007,21(1):118-121.  
ZHANG CH F,LI H X,LÜ M Y. Development of stealth technique compounded radar absorbing material and FSS[J]. *Mater. Rev.*,2007,21(1):118-121. (in Chinese)
- [3] SHA Y N,JOSE K A,NEO C P,*et al.*. Experimental investigations of microwave absorber with FSS embedded in carbon fiber composite[J]. *Microwave Opt. Techn. Let.*,2002,32(4):245-249.
- [4] AKIHIKO I,OSAMU H, HIDEHIRO Y,*et al.*. A fundamental study of thin  $\lambda/4$  wave absorber using FSS technology[J]. *Electronics and Communications in Japan(Part 1:Communications)*,2004,87(11):77-86.
- [5] MUNK B A. *Frequency Selective Surfaces:Theory and Design*[M]. New York:Wiley,2000.
- [6] 卢俊,张靓,孙连春. Y 形和 Y 环形单元特性的实验对比研究[J]. 光学精密工程,2005,13(2):219-224.  
LU J,ZHANG J,SUN L CH. Experimental comparison of the characteristics of Y element and Y loop element [J]. *Opt. Precision Eng.*,2005,13(2):219-224. (in Chinese)
- [7] FADI S,YAIR N O,AMICHAI R,*et al.*. Absorbing frequency selective surface for the mm-wave range[J]. *IEEE T. Antenn. Propag.*,2008,56(8):2649-2655.
- [8] 韩磊,马东辉,王自荣,等. 雷达吸波材料反射波极化特性分析[J]. 电子对抗,2007,5:21-24.  
HAN L,MA D H,WANG Z R,*et al.*. Analysis on polarization characteristics for the reflected waves of radar absorbing material[J]. *Electronic Warfare*,2007,5:21-24. (in Chinese)

作者简介:汪剑波(1978—),男,吉林长春人,讲师,主要从事薄膜物理与器件,频率选择表面的设计与研究。

E-mail:wangjianbo@126.com