

Influence of Cross-Unit FSS on the Characteristics of Radar Absorbing Materials

Jian-bo Wang¹, Jun Lu¹, Xin-yi Chen¹, Lian-chun Sun²

¹ School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, China

² Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, China

Email:wangjianbo@126.com

Abstract: Complex FSS's radar absorbing material is used as an effective means to stealth military objective from radar detection. Cross-unit FSS is designed in this paper and the absorbing material containing cross-unit FSS is numerically simulated by means of spectral domain approach. The reflection coefficient of microwave band at frequency 2-16GHz has been calculated and the influence of arrangement cycles on absorbing characteristics has been studied by adjusting unit spacing. The results show that cross-unit FSS expands absorbing materials' bandwidth and decreases resonance frequency's reflectivity. Meanwhile, the absorbing material's bandwidth expands with the expansion of unit arrangement cycles and the resonance frequency drifts towards to high frequency. When unit spacing is 10mm, complex structure has greater absorbing ability with 22dB reflectivity and 1.76GHz -8dB bandwidth.

Keywords: Frequency selective surface (FSS); Spectral domain approach; Absorbing materials; Resonant frequency; Bandwidth

十字单元 FSS 对雷达吸波材料特性的影响研究

汪剑波¹, 卢俊¹, 陈新邑¹, 孙连春²

¹ 长春理工大学理学院, 吉林长春, 中国, 130022

² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春, 中国, 130000

Email:wangjianbo@126.com

摘要: 使用复合频率选择表面的雷达吸波材料是一种实现军事目标对探测雷达波隐身的有效手段。通过设计了十字单元频率选择表面, 利用谱域法对包含有十字单元 FSS 的吸波材料进行数值模拟, 计算出频率为 2-16GHz 微波波段的反射系数, 并通过调整单元间距研究排列周期对吸波特性的影响。计算结果表明: 十字单元 FSS 拓展了吸波材料带宽, 降低了共振频率的反射率; 并且吸波材料带宽随单元排列周期增加而增大, 共振频率向高频漂移, 当单元间距为 10mm 时, 复合结构具有较强的吸波能力, 其反射率为 22dB, -8dB 带宽为 1.76GHz。

关键词: 频率选择表面; 谱域法; 吸波材料; 共振频率; 带宽

1 引言

使用雷达吸波材料是一种实现军事目标对探测雷达波隐身的有效手段。随着雷达探测以及反隐身技术的不断发展, 要求雷达吸波材料不断向“薄、轻、宽、强”的方向发展^[1]。研究人员采取了不同的方法来实现此目的, 其中, 在吸波材料中使用频率选择表面 (Frequency Selective Surface, 简称 FSS) 是一种切实可行的方法^[2-4]。

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, 与电磁波相互作用表现出空间滤波器的

功能^[5,6]。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^[7]。由于 FSS 的特性与单元的形式、排布周期、电磁波的极化等有关, 因此这些因素也将决定 FSS 对复合吸波材料性能的影响。国内从实验上研究 FSS 对吸波材料性能影响较多^[8], 理论仿真研究较少, 而关于 FSS 排布周期对吸波材料性能的影响尚未见报导。本论文设计了十字单元 FSS, 利用谱域法对这种 FSS 复合吸波结构进行仿真, 研究十字单元 FSS 在吸波材料中位置不同及单元排布周期不同对吸波材料特性的影响规律。

2 分析方法

项目资助: 教育部博士点新教师基金资助(No. 20092216120005)

FSS 分析方法有多种^[9]，本文采用谱域法对含有 FSS 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：

$$\mathbf{H}^s = -j\omega\epsilon_0\mathbf{F} + \frac{1}{j\omega\mu_0}\nabla(\nabla\cdot\mathbf{F}) \quad (1)$$

其中

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

$\mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 是自由空间格林函数，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}' 是源点，星号表示卷积运算， k_0 是自由空间波数。

根据电磁场边界条件，在单元中的切向磁场连续，并应用傅立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：

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

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha_{mn}^2 & -\alpha_{mn}\beta_{mn} \\ -\alpha_{mn}\beta_{mn} & k_0^2 - \beta_{mn}^2 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{G}}(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \begin{bmatrix} \tilde{M}_x(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \\ \tilde{M}_y(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \end{bmatrix} e^{j\alpha_{mn}x} e^{j\beta_{mn}y}$$

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

Ω 是 FSS 两个周期方向的夹角， D_x 、 D_y 是 FSS 二维方向的周期， α_{mn} 、 β_{mn} 是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(3)式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.复合吸波结构及仿真结果

3.1.吸波材料

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。本文采用文献[10]所报道的

雷达吸波材料参数(如表1)。采用谱域法对金属板上的这种吸波材料反射特性进行仿真，图1是吸波结构，图2是结构的反射特性曲线。可见这个结构的共振频率在4.1GHz，-8dB 带宽是1.291GHz，共振频率反射率 R 是 16.1dB。

Table 1. Parameters of Radar Absorbing Materials

层序	厚度	复介电常数	复磁导率
第一层	0.5mm	5.91-j2.41	1.04-j0.04
第二层	1.5mm	20.60-j3.07	1.13-j0.87
衬底	3mm	1.07	无

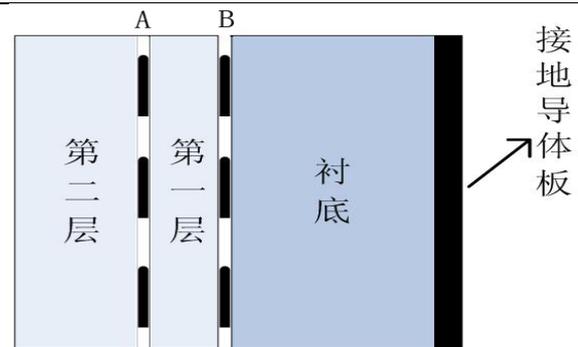


Figure 1 Absorbing Structure

图 1. 吸波结构

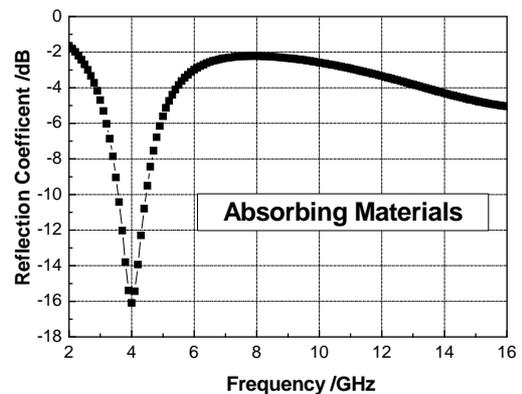


Figure 2. Characteristics of Absorbing Structure

图 2. 吸波结构特性曲线

3.2.FSS 复合吸波结构

在吸波结构中加入 FSS 构成复合吸波结构，FSS 可以复合在 A 或 B 两种位置(如图1所示)。设计的 FSS 单元为十字结构，其臂长为 4.25mm，臂宽为 2.5mm，

排列周期为 10mm, 正方形排列, 分别置于 A 或 B 位置。对复合 FSS 吸波结构与无 FSS 吸波材料的特性进行仿真对比研究, 对比曲线如图 3 所示。由模拟曲线可知, A 位置加入 FSS 的复合吸波结构共振频率在 5GHz, -8dB 带宽是 1.49GHz, 共振频率反射率 R 是 11.9dB; B 位置加入 FSS 的复合吸波结构共振频率在 5.2GHz, -8dB 带宽是 1.76GHz, 共振频率反射率 R 是 22dB。

可见, 在 B 位置复合十字单元 FSS, 更能使 -8dB 带宽得到有效拓展, 并且能有效增加反射率, 加强吸收电磁波能力。

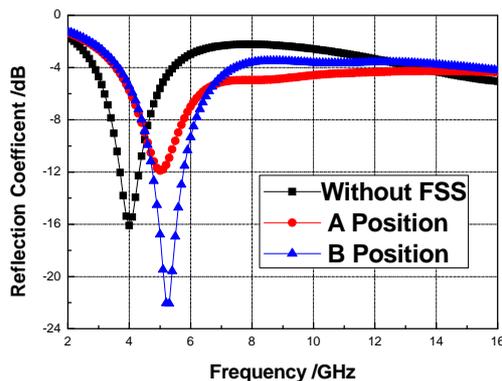


Figure 3. Correlation Curve of Composite FSS Absorbing Structure with Characteristics of Absorbing Materials
图 3. 复合 FSS 吸波结构与吸波材料特性对比曲线

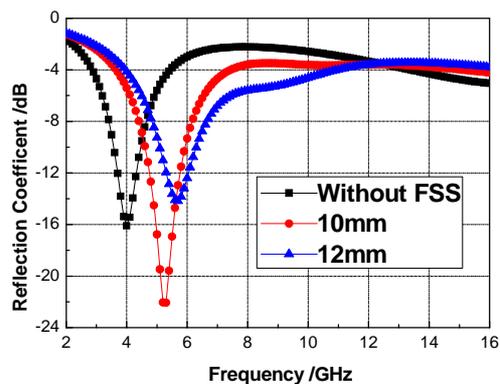


Figure 4. Influence of Unit Arrangement Cycle on Characteristics of Absorbing Structure
图 4. 单元排列周期对吸波结构特性的影响

在其它条件不变的情况下, 在 B 位置复合十字单元 FSS, 并将十字单元的排列周期增加为 12mm, 单元尺寸及排列方式不变, 仿真及对比结果如图 4 所示。可见,

随着单元排列周期的增加, 吸波结构的共振频率增加为 6GHz, 向高频漂移了, 并且 -8dB 带宽为 1.84GHz, 带宽明显增加宽, 对吸波材料性能影响更大。这是由于根据传输线理论, 频率选择表面的阻抗调节具有更大的自由度, 不仅可以通过改变 FSS 自身的电阻来实现, 还可以通过选取合适的 FSS 种类、单元形状和排布方式来改变 FSS 的电感和电容, 从而改变 FSS 的阻抗以实现阻抗匹配, 同时也可以通过在吸波材料的吸收峰频率附近设计 FSS 的谐振来拓宽频带。

4. 结论

本文设计了十字单元 FSS, 利用谱域法对 FSS 复合吸波结构的特性进行了仿真研究, 通过对比分析, 给出了 FSS 复合位置和单元排布周期对多层吸波材料特性的影响规律。根据对比研究发现, 利用 FSS 可以明显改善吸波材料涂层的吸波性能。在改善吸波材料带宽和降低共振频率反射率方面, 在底层添加 FSS 作用显著, 可使其反射率由 11.9dB 增加到 22dB, -8dB 处带宽由 1.49GHz 增加到 1.76GHz, 并且在其他条件不变的情况下, 随单元排列周期增大, 吸波带宽增加共振频率向高频漂移, 由 10mm 时的 1.76dB 增加到 1.84GHz。可见, 通过合理设计 FSS 结构参数, 会使其对吸波材料特性的改善达到使用要求。

References (参考文献)

- [1] Yuan C X, Zhou Z X, Qin R H, et al. Technical approach to obtain light, thin and broadband coated RAM [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39 (6) :956-959 (Ch). 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.
- [2] Zhang C F, Li H X, Lu M Y. Development of Stealth Technique Compounded Radar Absorbing Material and FSS [J]. *Materials Review*, 2007, 21 (1) : 118-121 (Ch). 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.
- [3] Akihiko I, Osamu H, Hidehiro Y and Kazutoshi S. A fundamental study of thin $\lambda/4$ wave absorber using FSS technology [J]. *Electronics and Communications in Japan*, 2004, 87(11):77-86.
- [4] Sha Y N, Jose K A, Neo C P, and Vijay K. Varadan. Experimental investigations of microwave absorber with FSS embedded in carbon fiber composite [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2002, 32(4):245-249.
- [5] Jia H Y, Gao J S, Feng X G, Novel element frequency selective surface. [J]. *Optics and Precision Engineering*. 2008, 16 (11) : 2076-2080 (Ch). 贾宏燕, 高劲松, 冯晓国. 新型单元的频率选择表面. [J]. 光学精密工程, 2008, 16 (11) : 2076-2080.
- [6] Lu J. Experimental comparison of the characteristics of Y element and Y loop element [J]. *Optics and Precision Engineering*. 2005, 13(2): 219-224 (Ch).

- 卢俊. Y形和Y环形单元特性的试验对比研究 [J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 219-224.
- [7] Lu J, Chen X Y, Wang J B. Effects of circular unit of FSS on the performance of wave absorbing materials [J], *Acta Physica Sinica*. 2008, 57(11):7200-7204 (Ch).
卢俊, 陈新邑, 汪剑波. 圆环单元 FSS 对吸波材料特性的影响研究 [J], 物理学报, 2008, 57(11):7200-7204.
- [8] Nie Y, Feng Z K, Zang X C, et al. The experimental studies of the application of FSS to microwave absorbing materials [J], *Journal of Huazhong University of Science and Technology*. 2004, 32(5): 50-52 (Ch).
聂彦, 冯则坤, 张秀成, 何华辉. FSS 在吸波材料中应用的实验研究 [J], 华中科技大学学报, 2004, 32(5): 50-52.
- [9] MITTRA R, CHAN C.H, CWIK T. Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review [J]. *Proc. of the IEEE*. 1988, 76(12):1593-1615.
- [10] 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 (Ch).
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.