

圆环单元 FSS 对吸波材料特性的影响研究*

卢 俊 陈新邑 汪剑波

(长春理工大学理学院, 长春 130022)

(2008 年 7 月 21 日收到)

设计了圆环单元频率选择表面(FSS),利用谱域法对包含有圆环单元 FSS 的吸波材料进行了仿真研究. 结果发现圆环单元 FSS 极大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半径增加而增大,共振频率向低频漂移,为 FSS 在吸波材料中应用提供理论依据.

关键词: 频率选择表面, 雷达吸波材料, 带宽, 谱域法

PACC: 7300, 7360

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,吸波频带宽是吸波材料研究热点^[1]. 频率选择表面(frequency selective surface, FSS)是一种周期性的结构,可设计为电磁带隙结构^[2]. 研究人员采取不同方法拓宽雷达吸波材料的带宽^[3],其中将 FSS 复合到吸波材料中是一种切实可行的方法^[4,5]. 在吸波材料电磁特性确定的情况下,特性不同的 FSS 单元对复合吸波材料特性的影响不同. 国内从实验上研究 FSS 对吸波材料性能影响较多^[6],理论仿真研究较少. 本文设计了圆环单元 FSS,利用谱域法对这种 FSS 复合吸波结构进行仿真,研究圆环单元 FSS 对吸波材料特性的影响规律.

2. 分析方法

FSS 分析方法有多种^[7],论文采用谱域法^[8]对含有 FSS 吸波结构进行分析.

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

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

其中

$$F(r) = \int G(r, r') M(r') dr' \\ = G * M, \quad (2)$$

$G(r, r')$ 是自由空间格林函数,且

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

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

$$\begin{pmatrix} H_x^{inc}(x, y) \\ H_y^{inc}(x, y) \end{pmatrix} \\ = \frac{4\pi}{j\omega\mu_0 D_x D_y} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha_{mn}^2 & -\alpha_{mn}\beta_{mn} \\ -\alpha_{mn}\beta_{mn} & k_0^2 - \beta_{mn}^2 \end{bmatrix} \\ \times \tilde{G}(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \begin{bmatrix} \tilde{M}_x(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \\ \tilde{M}_y(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \end{bmatrix} e^{j\alpha_{mn}x} e^{j\beta_{mn}y}, \quad (4)$$

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 M 分布,即可获得用 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.

* 国家自然科学基金(批准号:10647105)资助的课题.

3. 复合吸波结构及仿真结果

3.1. 吸波材料

文献 9 报道了双层雷达吸波材料. 第一层的厚度 $d_1 = 0.5 \text{ mm}$; 复电容率是 $\epsilon = 5.91 - j2.41$; 复磁导率 $\mu = 1.04 - j0.04$. 第二层的厚度 $d_2 = 1.5 \text{ mm}$; 复电容率 $\epsilon = 20.60 - j3.07$; 复磁导率 $\mu = 1.13 - j0.87$. 本文利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 4.1 GHz, -4 dB 带宽是 2.3 GHz, 共振频率反射率 R 是 12.3 dB.

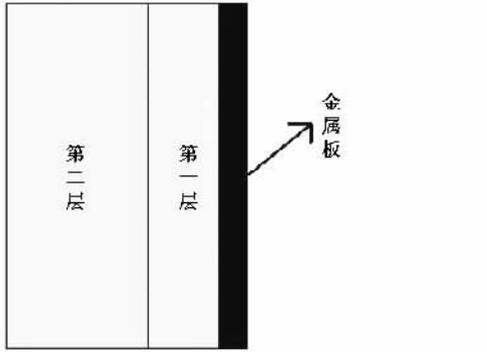


图 1 吸波结构

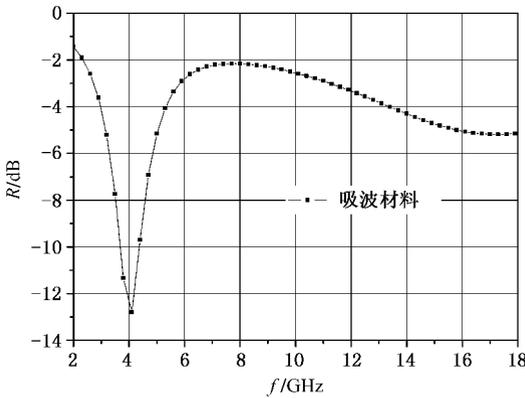


图 2 吸波结构特性曲线

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, 如图 3 所示. 文中设计的 FSS 单元为圆环形, 半径 $r = 3 \text{ mm}$, 缝宽 $W = 0.5 \text{ mm}$; 周期是 10 mm , 正方形排列. 衬底厚度 3 mm , 介电常数是 1.07, 损耗在 10^{-3} 量级. FSS 吸波结构与无 FSS 吸波材料反射特性对比如图

4. FSS 复合吸波结构谐振频率在 5.6 GHz, 透过率 14 dB , -4 dB 带宽是 8.1 GHz . 可见, 加入圆环单元 FSS 后将 -4 dB 拓宽到 8.1 GHz , 并且谐振频率反射率下降了 1.2 dB , 吸收电磁波能力加强了.

在其他条件不变的条件下, 将圆环单元的半径增加为 4 mm , 宽度不变, 仿真及对比结果如图 5 所示. 可见随着单元半径的增加, 吸波结构的共振频率为 4.7 GHz , 向低频漂移了, 并且 -4 dB 带宽为 8.6 GHz , 带宽更宽, 对吸波材料性能影响更大.

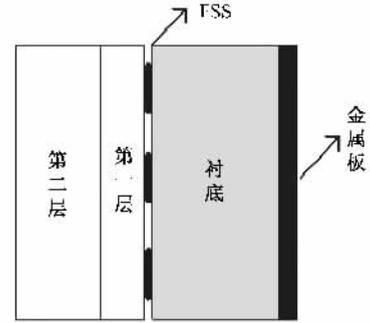


图 3 FSS 复合吸波结构

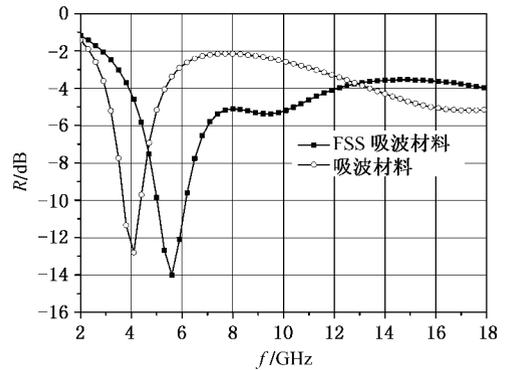


图 4 吸波材料与 FSS 吸波结构特性对比

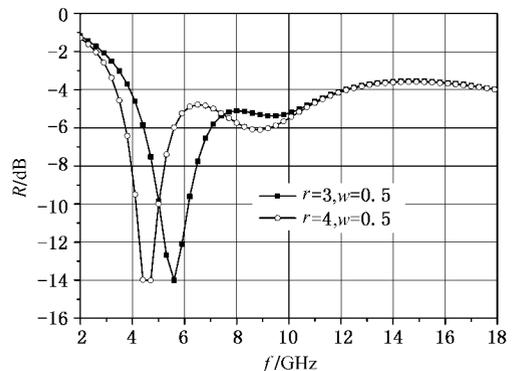


图 5 圆环单元半径对吸波结构特性的影响

4. 结 论

FSS 特性是单元的周期、衬底电性能^[10]、单元尺寸等的函数,这些因素影响 FSS 的特性,也将影响 FSS 吸波结构的特性. 本文根据文献的吸波材料参

数,设计了圆环单元 FSS,并采用谱域法对 FSS 复合吸波结构进行了仿真研究,结果发现圆环单元 FSS 极大扩展了吸波材料的带宽,并且在其他条件不变的情况下,随圆环半径增大吸波带宽增加,共振频率向低频漂移,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.

-
- [1] Zhang C F , Li H X , Lü M Y 2007 *Materials Review* **21** 118 (in Chinese)[张朝发、李焕喜、吕明云 2007 材料导报 **21** 118]
- [2] Akhoondzadeh-Asl L , Kem D J , Hall P S , Werner D H 2007 *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **55** 2426
- [3] Zou T C , Zhao N Q , Shi C S 2005 *Journal of Function Materials* **11** 1689 (in Chinese)[邹田春、赵乃勤、师春生 2005 功能材料 **11** 1689]
- [4] Sha Y N , Jose K A , Noe C P *et al* 2002 *Microwave Opt. Techn. Lett.* **32** 245
- [5] Jose K A , Sha Y N , Waradan V K *et al* 2002 *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* **2** 576
- [6] Nie Y , Feng Z K 2004 *Journal of Huazhong University of Science and Technology* **32** (5) 50 (in Chinese)[聂彦、冯则坤 2004 华中科技大学学报 **32** (5) 50]
- [7] Mittrar R , Chan C H , Cwik T 1988 *Proc. of the IEEE* **76** 1593
- [8] Li X Q , GAO J S , Zhao J L , Sun L C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3803 (in Chinese)[李小秋、高劲松、赵晶丽、孙连春 2008 物理学报 **57** 3803]
- [9] Han L , Ma D H , Wang Z R *et al* 2007 *Electronic Warfare* **5** 21 (in Chinese)[韩磊、马东辉、王自荣等 2007 电子对抗 **5** 21]
- [10] He Z , Lu J , Sun G C *et al* 2008 *Chinese Optics Letters* **6** 54

Effects of circular unit of FSS on the performance of wave absorbing materials^{*}

Lu Jun Chen Xin-Yi Wang Jian-Bo

(College of Physics , Changchun University of Science and Technology , Changchun 130022 , China)

(Received 21 July 2008)

Abstract

Frequency selective surface (FSS) is a two-dimensional array structure , which can be used to improve the performance of radar absorbing materials . We design circular unit of FSS , and give a simulation research on the circular unit of FSS with the spectral domain approach . The result shows that the circular unit of FSS greatly widens the bandwidth of radar absorbing materials , and decreases the reflectivity of resonance frequency ; the bandwidth of radar absorbing materials increases with the increasing radius of the unit , and the resonance frequency drifts to low frequency , which provides theoretical support to the application of FSS in wave absorbing materials .

Keywords : frequency selective surface , radar absorbing materials , bandwidth , spectral domain approach

PACC : 7300 , 7360

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10647105) .