

# 一种基于超材料的吸波材料的设计与制备

孙良奎<sup>†</sup> 程海峰 周永江 王 军 庞永强

(国防科技大学航天与材料工程学院, 新型陶瓷纤维及其复合材料

国防科技重点实验室, 长沙 410073)

(2010年10月26日收到; 2010年12月27日收到修改稿)

设计了一种基于超材料的吸波材料, 吸波材料由周期性排列的电阻片, 基体以及金属背底构成. 采用时域有限差分法(FDTD)计算了吸波材料的反射率, 并用遗传算法优化了吸波材料的吸波带宽, 得到一种反射率在8—18 GHz 小于 -10 dB 的吸波材料, 材料厚度仅为3 mm. 采用手糊工艺制备了空心石英纤维增强环氧树脂基体, 丝网印刷制备了电阻片, 实现了所设计的吸波材料, 测试表明, 实验结果和设计结果一致.

**关键词:** 雷达吸波材料, 超材料, 频率选择表面, 遗传算法

**PACS:** 89.20.Dd

## 1. 引言

吸波材料是隐身技术中的重要隐身形式, 传统的磁性吸收剂存在使用温度低, 密度大的缺点<sup>[1]</sup>. 因此, 新型吸波材料的研究是实现吸波材料薄、轻、宽、强的有效途径.

超材料是一种人工电磁功能材料<sup>[2]</sup>, 是目前电磁学, 材料学研究的热点<sup>[3,4]</sup>. 以左手材料, 光子晶体, 频率选择表面(FSS)为代表的超材料在光学成像, 小型化天线, 电磁波隐形等领域有广泛的应用前景<sup>[5]</sup>. 目前, 超材料的研究热点集中在低损耗, 宽频带超材料的设计与制备<sup>[6-8]</sup>, 损耗高和频带窄也是超材料在很多领域应用的瓶颈问题. 但是, 另外一方面, 吸波材料对材料的要求是高损耗, 宽频带. 因此, 利用超材料自身存在的损耗, 甚至额外在超材料中引入损耗有可能实现低反射率的吸波材料. 超材料吸波体的研究也是目前超材料研究的一个热点<sup>[9,10]</sup>, 以左手材料吸波体为代表, 大多数研究集中在增大吸收强度, 调节吸收频率. 该类吸波材料主要用于高灵敏的探测器件<sup>[11]</sup>. 隐身技术中的吸波材料, 需要满足宽频带的要求.

基于上述超材料吸波材料的设计思想和研究现状, 在传统 FSS 采用金属周期阵列的基础上, 本文设计了一种基于电阻型 FSS 的吸波材料, 电阻型 FSS 也是一种人工周期结构, 能够通过改变周期阵

列参数改变其电磁特性. 吸波材料由电阻片阵列, 介质基体及金属背衬构成, 采用遗传算法对其吸波性能进行了优化. 通过选用一定的电阻片方阻, FSS 的周期尺寸, 基体的介电常数, FSS 在基体中的位置, 设计出在 8—18 GHz 范围内反射率小于 -10 dB 的宽频吸波材料. 并探讨了该类吸波材料的实现形式.

## 2. 吸波材料的设计与优化

### 2.1. 电阻型 FSS 吸波材料设计原理及优化方法

本文所设计的吸波材料四分之一结构单元模型如图 1 所示. 单元结构参数已在图中标注.

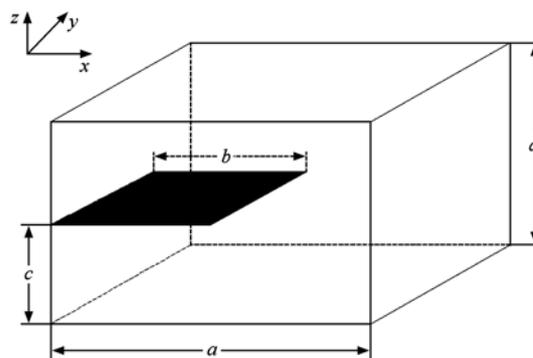


图 1 电阻型 FSS 四分之一周期示意图

<sup>†</sup> E-mail: slk\_0\_1999@yahoo.com.cn

众所周知,吸波材料实现对电磁波能量的损耗,必须满足两个条件:一是阻抗匹配特性,二是损耗特性<sup>[12]</sup>. 采用等效电路法对电阻型 FSS 的表面阻抗进行计算<sup>[13]</sup>,图 2 所示为电阻型 FSS 吸波材料的模型及其等效电路图.

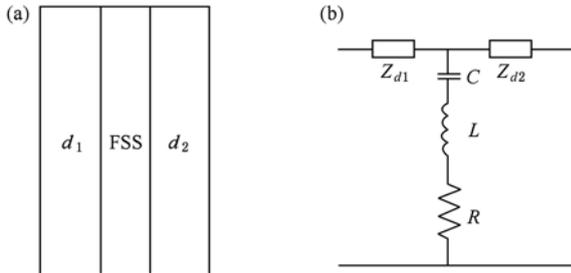


图 2 电阻型 FSS 吸波材料模型及等效电路模型 (a)电阻型 FSS 吸波材料模型;(b)电阻型 FSS 吸波材料等效电路模型

电阻型 FSS 等效为 RLC 串联,阻抗  $Z_{FSS}$  计算如下:

$$Z_{FSS} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}, \quad (1)$$

则吸波材料的阻抗  $Z_R$  计算如下:

$$Z_R = \frac{Z_{d1}Z_{d2}Z_{FSS}}{(Z_{d1} + Z_{d2})Z_{FSS} + Z_{d1}Z_{d2}}, \quad (2)$$

其中,介质阻抗  $Z_{d1}$  与  $Z_{d2}$  与介质厚度有关,

$$Z_d = j \sqrt{\mu_r \mu_0 / \epsilon_r \epsilon_0} \tan(\beta d), \quad (3)$$

$\beta$  为电磁波在介质中的传播常数,由(1),(2),(3)式即可计算吸波结构的阻抗  $Z_R$ ,计算发现,等效电路模型电路参数取适当值时,吸波结构阻抗为 377  $\Omega$ ,满足阻抗与自由空间阻抗匹配的条件.

同时,与金属 FSS 相比,电磁波在电阻型 FSS 上产生感应电流,电流转变成热能损耗掉. 这就是电阻型 FSS 吸波材料的设计原理. 控制 FSS 的阻抗特性可以调节 FSS 的响应频带和欧姆损耗. 因此,合理的设计 FSS 单元结构参数是实现宽频吸波材料的关键.

等效电路方法能够分析 FSS 的阻抗特性,但是在精确计算吸波性能方面存在不足<sup>[14]</sup>,因此,本文采用精确的数值计算方法 FDTD 计算所设计结构的反射率<sup>[15,16]</sup>. 采用平面波激励源,入射方向为  $z$  方向, $x$  方向采用电边界, $y$  方向采用磁边界, $z$  方向底部采用理想电壁,顶部设置为 PML 吸收边界.

由前面的分析及图 1 知道,电阻型 FSS 吸波材料的设计参数较多,可设计空间较大,而且各参数都对吸波性能有很大的影响<sup>[17]</sup>,因此要得到理想的

吸波性能,需要对各参数进行优化设计. 本文所采用的设计方法为遗传算法(GA)<sup>[18]</sup>,其算法流程图如图 3 所示.

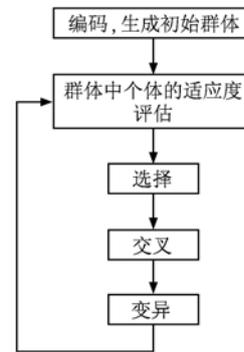


图 3 遗传算法流程图

采用遗传算法的关键是选择合适的种群,设置合适的交叉变异概率和适应度函数,本文的设置如表 1 所示.

表 1 遗传算法参数设置

种群数量	交叉概率	变异概率	适应度函数
800	0.7	0.1	适应度函数 = $1 - \sum_i f_i / (f_{\max} - f_{\min})$

其中  $f_{\max}$  和  $f_{\min}$  为计算的频率上限和下限,  $f_i$  为满足阈值条件的频率点,当适应度函数为 0 时,在所计算的频段内反射率均满足阈值条件,阈值条件设为  $R_c < -10$ .

### 2.2. 数值计算及优化结果

首先各参数任意取值,当  $a = 6$  mm,  $b = 5$  mm,  $c = 2$  mm,  $R_s = 40 \Omega/\square$ ,  $\epsilon_r = 3$  时计算吸波材料反射率如图 4 所示.

由图 4 可见,未经优化的电阻型 FSS 吸波材料在较宽的频段具有吸波性能,但是吸波性能较差,所以任意取值的吸波性能不理想,8—18 GHz 反射率仅为 -4 dB.

保持吸波材料单元尺寸  $a$  和厚度  $d$  不变,对吸波材料的介质层介电常数  $\epsilon_r$ ,电阻片方阻  $R_s$ ,电阻片边长  $b$ ,电阻片在基体中的位置  $c$  进行优化,计算次数为 680 次,优化结果如图 5 所示.

计算结果在 10 GHz 附近出现吸收峰,满足反射率要求. 此时, FSS 结构单元参数  $\epsilon_r = 2.65$ ,  $R_s = 72 \Omega/\square$ ,  $c = 3$  mm,  $b = 3.82$  mm,即电阻片在基体表面时,目标函数最小,带宽最大.

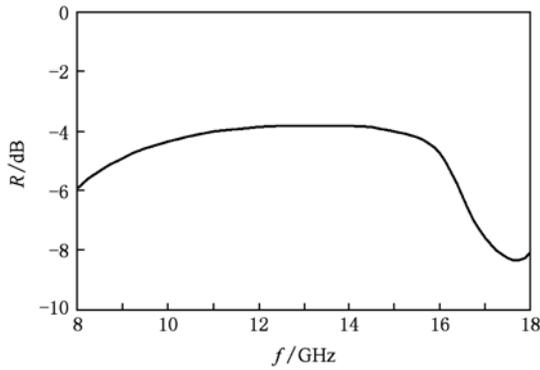


图4 吸波材料周期结构参数任意取值时的反射率

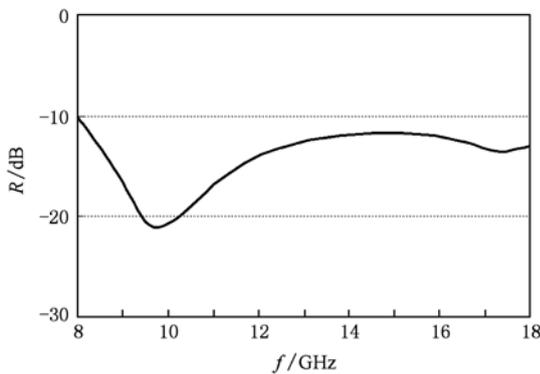


图5 经过遗传算法优化后吸波材料的反射率

由设计结果可以看出,各优化参数对吸波材料反射率影响较大,各因素对反射率的影响及其影响机理将在后续研究中给出.

### 3. 实验验证

为验证设计结果,我们制备了结构参数满足设计结果的吸波材料,以自制酚醛改性环氧树脂和空心石英纤维布为原料,采用手糊工艺制备了满足基体介电常数条件的石英纤维增强环氧树脂基体,基体参数如表2所示.

表2 玻璃纤维增强环氧树脂基体参数

原料	型号	介电常数	用量	基体参数
空心石英纤维布	04型	2.52	7层	厚度 3.12 mm
	02型	2.52	1层	介电常数:
酚醛改性环氧树脂	KD-1型	3.05	40 g	2.67

将制备的基体打磨至厚度为 3 mm,然后以导电油墨为原料,利用丝网印刷工艺在基体上印刷了满足方阻要求的电阻片图案,得到设计的吸波材料,

如图6所示为吸波材料实物图,采用自由空间法测试了制备的吸波材料的反射率,测试结果如图7所示.

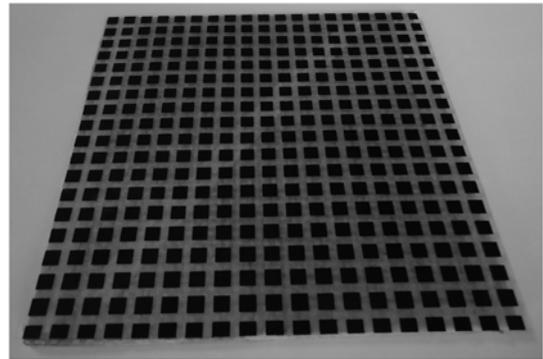


图6 电阻型 FSS 吸波材料实物图

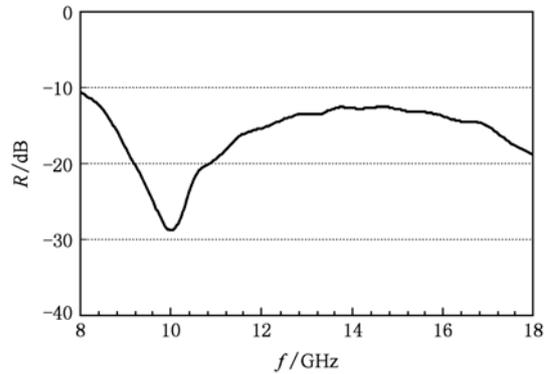


图7 电阻型 FSS 吸波材料反射率

测试结果表明,在 10 GHz 左右出现吸收峰,8—18 GHz 范围内反射率均小于 -10 dB,通过对比设计结果和实验结果,可以发现,实验结果与设计结果基本符合,甚至比设计结果更好,这说明,经过遗传算法优化得到的结果虽然满足了既定的设计目标,得到了较优的结果,但是不一定是最优结果.

### 4. 结 论

本文利用超材料的可设计性较强的思想,在传统金属 FSS 的基础上引入电阻型 FSS,设计了一种基于电阻型 FSS 的吸波材料,采用遗传算法对各 FSS 各参数进行优化,得到在 8—18 GHz 反射率小于 -10 dB 的吸波材料,材料厚度仅为 3 mm. 采用手糊工艺制备吸波材料的介质基体,丝网印刷制备了电阻型 FSS,得到电阻型 FSS 吸波材料,实验验证了所设计的吸波材料,实验结果和设计结果符合.

- [1] Ha E H, Huang D Q, Ding H Y 2006 *Material Engineering* **3** 55 (in Chinese) [哈恩华、黄大庆、丁鹤雁 2006 材料工程 **3** 55]
- [2] Smith 2004 *Science* **305** 788
- [3] Cheng Y Z, Xiao T, Yang H L, Xiao B X 2010 *Acta Phys. Sin* **59** 5715 (in Chinese) [程用志、肖 婷、杨河林、肖柏勋 2010 物理学报 **59** 5715]
- [4] Lagakov A N, Kisel V N 2001 *Dokl Phys.* **46** 163
- [5] Cui W Z, Ma W, Qiu L D, Zhang H T 2008 *Electromagnetic Metamaterials and its Applications* (Bei Jing: National Defense Industry Press) p9 (in Chinese) [崔万照、马 伟、邱乐德、张洪太 2008 电磁超介质及其应用(北京:国防工业出版社)第 9 页]
- [6] Markōs P, Soukoulis C M 2002 *Physical Review E* **65** 622
- [7] Podolskiy V A, Alekseev L, Narimanov E 2005 *Journal of Modern Optics* **16** 2343
- [8] Cheng H S 2005 *Ph. D. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [陈红胜 2005 博士学位论文(杭州:浙江大学)]
- [9] Zhang Y P, Zhao X P, Bao S, Luo C R 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6078 (in Chinese) [张燕萍、赵晓鹏、保 石、罗春荣 2010 物理学报 **59** 6078]
- [10] Fan J, Cai G Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6084 (in Chinese) [樊京、蔡广宇 2010 物理学报 **59** 6084]
- [11] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Physical Review Letters* **20** 207402-1
- [12] Zhou Y J 2006 *Ph. D. Dissertation* (Changsha : University of National Defence Technology) (in Chinese) [周永江 2006 博士学位论文(长沙:国防科技大学)]
- [13] Filippo C, Agostino M, Giuliano M 2010 *IEEE Transactions on antennas and propagation* **58** 1551
- [14] Filippo C, Agostino M, Giuliano M 2009 *IEEE Transactions on antennas and propagation society international symposium USA* 2009
- [15] Yang H, Mittra R 2009 *FDTD Model of Metamaterials: Theory and Applications* (London: Artech House)
- [16] Wang S Y, Liu S B, Le W J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 084101
- [17] Liu H T, Cheng H F, Chu Z Y, Zhang D Y 2007 *Materials & Design* **28** 2166
- [18] Lu J, Wang J B, Sun G C 2009 *Chin. Phys. B* **18** 15

## Design and preparation of a radar-absorbing material based on metamaterial

Sun Liang-Kui<sup>†</sup> Cheng Hai-Feng Zhou Yong-Jiang Wang Jun Pang Yong-Qiang

(Key Laboratory of Advanced Ceramic Fibers and Composites, College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

(Received 26 October 2010; revised manuscript received 27 December 2010)

### Abstract

A kind of radar-absorbing material (RAM) based on metamaterial, which contains resistive patches, dielectric substrate and metal backing, is designed. The reflectivity of the RAM is calculated using the finite difference time-domain method (FDTD) and optimized by genetic algorithm (GA). Then RAMs with a reflectivity bandwidth of 8—18 GHz below -10 dB is obtained. Moreover, its thickness is only 3mm. To confirm the design results, the RAM is prepared by fabricating a hollow quartz fibre reinforced epoxy resin substrate through using hand lay-up process and making the resistive patches by screen painting. The reflectivity of the absorber is measured, showing that the experimental result is consistent with the design value.

**Keywords:** radar-absorbing materials, metamaterials, FSS, genetic algorithm

**PACS:** 89.20.Dd

---

<sup>†</sup> E-mail: slk\_0\_1999@yahoo.com.cn