

文章编号: 1001- 2486(2009) 04- 0058- 04

集总电阻加载的超薄吸波材料设计*

李有权¹, 王利伟², 张光甫¹, 张 辉¹, 袁乃昌¹

(1. 国防科技大学 微波技术发展中心, 湖南 长沙 410073;

2. 空军第一航空学院 航空电子工程系, 河南 信阳 464000)

摘要: 通过在周期结构中加载集总电阻, 能够有效吸收入射电磁波, 减小目标 RCS。给出了两种超薄吸波结构, 都具有厚度薄、重量轻的特点。分析了两种吸波材料的吸波机理, 给出了表面反射系数的计算公式。实际加工了两种吸波材料, 并对其吸波性能进行了分析。

关键词: 雷达吸波材料; 高阻表面; 方形环; 集总电阻

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A

Design of Ultra-thin Absorbing Material Loaded with Lumped Resistors

LI You-quan¹, WANG Li-wei², ZHANG Hui¹, ZHANG Guang-fu¹, YUAN Nai-chang¹

(1. Microwave Technology Development Center, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Department of Aeronautic Electronic, First Aeronautic Institute of Air Force, Xinyang 464000, China)

Abstract: Lumped resistors are introduced to period structures to absorb the incident wave effectively, and this can reduce the RCS of target. Two absorbing structures, which are designed to be thin and light, are presented. The absorbing principle is analyzed and formulas of reflection coefficient are given. Samples of two absorbing material are fabricated and the absorbing performance is analyzed.

Key words: radar absorbing material; high impedance surface(HIS); square loops; lumped resistor

雷达隐身技术是现代电子战的一项重要内容, 其中雷达隐身材料是应用最广泛的一种方法。雷达吸波材料(Radar Absorbing Material, RAM)能有效吸收入射电磁波, 并将其能量转化成热量而损耗掉, 可以减小电磁波反射能量, 已经广泛应用于飞行器隐身及电子设备抗干扰。最常用的雷达吸波材料是 Salisbury 吸收屏^[1], 它是由损耗层和间隔层组成的一种结构, 将电阻片放置在距离底板 1/4 波长处, 能有效吸收入射电磁波。由于其尺寸过大, 应用受到限制。从工程应用角度来看, RAM 应具有厚度薄、重量轻、吸收频带宽、易于施工和价格便宜等特点, 所以实现超薄吸波材料一直是国内外学者的研究目标。

为了获得性能优异的吸波材料, 世界各国都在致力于开发新型吸波机制的吸波材料。国外学者提出采用光子晶体实现超薄吸波结构^[2-3], N. Engheta 首次提出用 metamaterial 来获得超薄吸收材料的思想^[4], D. J. Kern 等人用含损耗的频率选择表面(HZFSS)^[5]实现了超薄宽带吸收材料, 但设计方法较为复杂, 很难在实际中得到应用。国内研究较多的是电路模拟吸波材料^[6], 它是由有耗介质与频率选择表面(电路屏)复合而成的吸波材料。最初应用于电路模拟吸波材料中的一般是方格栅型或十字型等简单形式的频率选择表面(FSS)。本文通过在周期结构中引入集总电阻来进行超薄吸波材料设计, 它们是基于高阻表面的吸波材料和基于方形环的吸波材料。文中分析了两种结构的吸波机理, 利用传输线模型分析表面反射系数, 并给出了设计公式。实际加了两种吸波结构样品, 并对测试结果进行了分析。

1 基于高阻表面的吸波材料

采用高阻表面(High Impedance Surfaces, HIS)和贴片集总电阻可实现超薄吸波结构^[7]。如图 1 所示

* 收稿日期: 2009- 02- 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60871069)

作者简介: 李有权(1980—), 男, 博士生。

为基于高阻表面吸波结构的结构图,金属贴片按方形周期排列,通过过孔与金属底板连接,介质基板厚度为 h , 相对介电常数为 ϵ_r , 贴片之间加载集总电阻。这种结构原理和单层 Salisbury 屏是大致相同的,利用高阻表面代替了 Salisbury 屏中的底板,损耗层在高阻表面上,由于高阻表面的同相反射特性,可以实现超薄吸波结构。图 2 为基于高阻表面吸波材料样品。

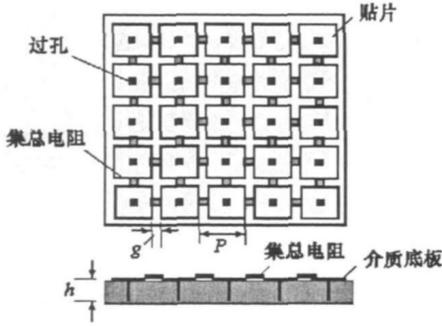


图 1 基于高阻表面吸波材料结构图

Fig. 1 Structure of HIS based RAM

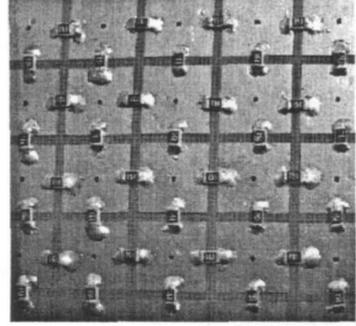


图 2 高阻表面吸波材料样品

Fig. 2 Sample of HIS based RAM

对于高阻表面吸波材料可以采用传输线模型对高阻表面进行建模。对于垂直入射波,在贴片周期 $P \ll \lambda$ 的情况下,根据传输线理论,高阻表面的表面阻抗等效为贴片容抗 Z_g 、介质板表面感抗 Z_s (假定贴片阵与介质板之间没有相互作用) 和集总电阻 R 的并联,如图 3 所示。整个结构表面的等效输入阻抗可表示为

$$\frac{1}{Z_{inp}} = \frac{1}{Z_g} + \frac{1}{Z_s} + \frac{1}{R_s} \quad (1)$$

高阻表面方形贴片阵为容性,其容抗可以表示为

$$Z_{g\text{patch}} = \frac{\eta_{eff}}{j2\alpha} \quad (2)$$

其中,

$$\alpha = \frac{k_{eff}P}{\pi} \ln \left(\frac{2P}{\pi g} \right) \quad (3)$$

有效波阻抗为 $\eta_{eff} = \eta_0 / \sqrt{\epsilon_r}$, 有效波数为 $k_{eff} = k_0 \sqrt{\epsilon_r}$ 。

介质板的输入阻抗为感性,对于垂直入射波,其输入阻抗表示为:

$$Z_s \approx j\omega\mu h \quad (4)$$

对于垂直入射波加载电阻的高阻表面的反射系数为

$$R = \frac{Z_{inp} - \eta}{Z_{inp} + \eta} \quad (5)$$

其中, η 为自由空间波阻。

设计高阻表面吸波结构采用如下参数:高阻表面贴片单元大小为 8mm, 缝隙宽度为 0.5mm, 介质板厚度为 3mm, 介电常数为 3.5mm, 过孔直径为 0.8mm。仿真吸波材料反射系数时,假定加载电阻阻值为 377 Ω ,高阻表面反射相位及吸波材料表面反射系数仿真结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出,高阻表面同相反射相位在 $\pm 60^\circ$ 范围内是 4.41G~ 5.24GHz, 其中心谐振频率为 4.81GHz。加载电阻后其表面反射系数低于 -10dB 的频带为 4.36G~ 5.28GHz, 吸收最好的地方是 4.82GHz。从仿真结果看,加载电阻能有效吸收入射电磁波,其吸波位置由高阻表面反射相位决定,低于 -10dB 的频带与高阻表面同相反射相位 $\pm 60^\circ$ 范围相对应。制作了同样参数的两块高阻表面,并在其上加载集总电阻,加载电阻阻值按等效关系选择 620 Ω ^[8],在微波暗室中分别测量了高阻表面的反射相位及加载电阻后吸波效果,测量结果如图 5 所示。从图中可以看出,其同相反射相位在 $\pm 60^\circ$ 范围内的频带为 4.52G~ 5.24GHz,与仿真结果基本一致。吸波频带为 4.01G~ 4.73GHz,其吸波带宽与仿真结果

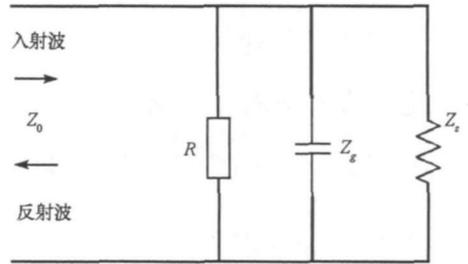


图 3 高阻表面吸波结构等效模型

Fig. 3 Equivalent circuit of HIS based RAM

基本一致,只是中心频率向低频发生偏移,其主要原因是加载的集总电容在高频时有较大的寄生电容,导致吸波频率往低频移动。仿真及实验结果表明,在高阻表面上加载集总电阻能有效吸收入射电磁波,其吸收频带由高阻表面同相反射相位决定,在设计这种吸波材料时,加载电容的寄生电容必须加以考虑。

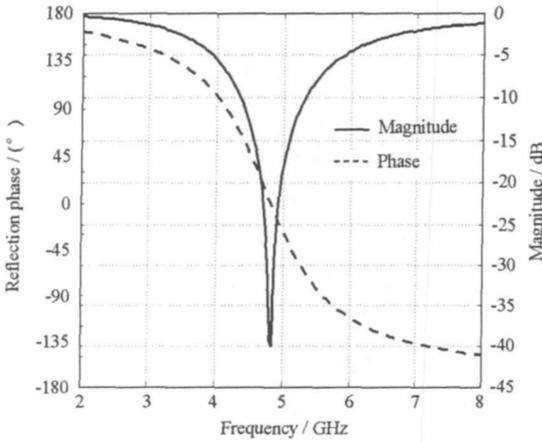


图4 反射相位及反射系数仿真结果

Fig. 4 Simulated reflection phase and coefficient

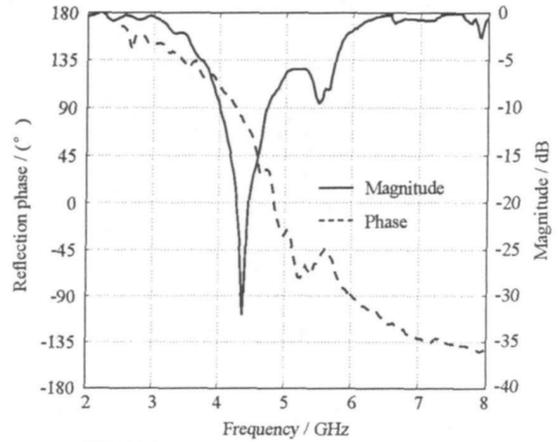


图5 反射相位及反射系数测量结果

Fig. 5 Measured reflection phase and coefficient

2 基于方形环的吸波材料

单环结构是一种常用的频率选择表面单元,作为 FSS 单元,其透射及反射性能已经得到了深入研究。当电磁波垂直入射到周期排列的方形环表面时,在方形环四条边上都会形成感应电流,如图 6 所示。周期排列的方形环输入阻抗可用传输线模型得到,等效 LC 模型在文献[9]中给出,它包括单环自身的电感和相邻环之间的电容,其表面电抗为

$$\frac{X_L}{Z_0} = \frac{d}{p} F(p, 2s, \lambda) \quad (6)$$

同样,相邻环间电纳为

$$\frac{B_C}{Z_0} = 4 \frac{d}{p} F(p, g, \lambda) \quad (7)$$

其中,

$$F(p, w, \lambda) = \frac{p}{\lambda} \cos \theta \left[\ln \left[\cos \operatorname{ec} \frac{\pi 2 w w}{2 p} \right] + G(p, w, \lambda) \right] \quad (8)$$

式中, p 为方形环阵列周期, d 为方形环外边长度, s 为环的宽度, g 为阵列间宽度, w 分别代表感抗中的 $2s$ 和电纳中的 g 。

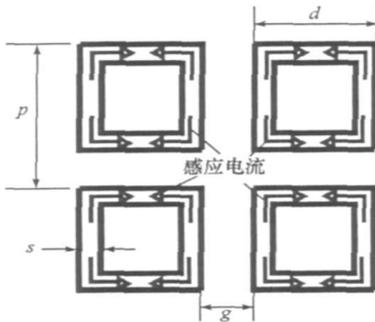


图6 方环表面电流

Fig. 6 Current distribution on square loops

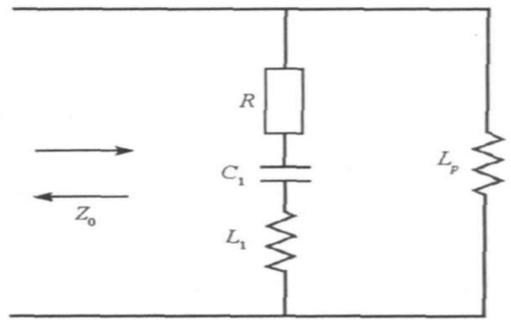


图7 方形环吸波结构等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit of square loops based RAM

在单环结构中引入集总电阻,能够吸收表面感应电流,有效减少电磁波反射能量。基于方形环的超薄吸波结构其表面为金属方形环,底部为金属接地板,中间为介质基板。为了有效吸收入射电磁波,在

金属方形环的四周均加载集总电阻。表面输入阻抗等效电路如图 7 所示。其中 L_1 为方形环等效电感, C_1 为方形环间的等效电容, L_p 为介质板等效电感, R 为加载电阻, 其表面反射系数可通过式(6)~(8)计算。

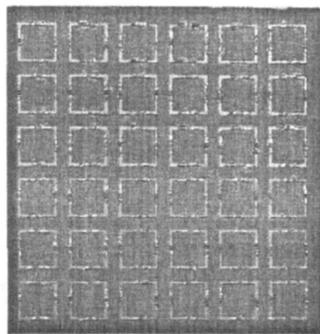


图 8 加载电阻的方环吸波结构
Fig. 8 Lumped resistor loaded RAM
based on square loops

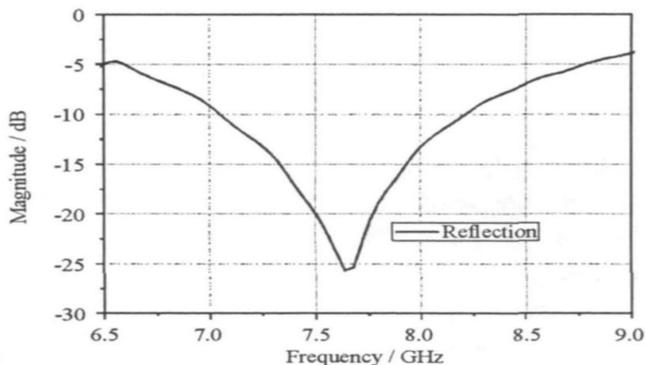


图 9 方形环吸波结构反射系数测量结果
Fig. 9 Measured reflection coefficient
of square loops based RAM

基于方形环吸波材料如图 8 所示, 其参数如下: 方形环周期 $p = 13\text{mm}$, 方形环边长 $d = 10\text{mm}$, 方形环边宽度为 $s = 0.8\text{mm}$, 所采用介质板厚度为 $t = 3\text{mm}$, 介电常数为 3.5, 加载电阻阻值为 510Ω 。当电磁波垂直入射到吸波结构表面时, 其表面反射系数如图 9 所示, 从图中可以看出在 $7.05\text{GHz} \sim 8.21\text{GHz}$ 范围内其表面反射系数均低于 -10dB , 在 7.65GHz 时吸波效果最好, 达到了 -25.9dB 。测量结果说明, 在这个频段入射电磁波都能够被有效吸收。方形环吸波结构吸波效果与其方形环周期、方形环边长、介质基板厚度、介电常数及加载电阻阻值均相关, 调节这些参数可以实现不同频段的吸波效果。方形环吸波结构还可以通过不同的方形环重叠, 如采用双方形环加载结构实现宽带吸波^[10]。与高阻表面吸波材料相比, 方形环吸波材料的结构偏大, 同样周期同样参数的介质板的两种吸波结构, 高阻表面吸波结构的吸波频段要低得多, 容易实现低频吸波。

3 结论

分析了两种超薄吸波结构的设计原理及设计方法, 它们均通过在周期金属结构中加载集总电阻实现吸波效果。两种吸波结构基于不同的吸波原理。基于高阻表面的吸波结构利用同相反射特性实现超薄结构, 在其表面加载集总电阻形成损耗层, 能够有效吸波入射电磁波。方形环周期结构在其表面会产生表面电流, 在其四周加载集总电阻能够有效吸收入射电磁波。给出了两种吸波结构的设计公式。对实际加工的吸波材料反射系数进行测量, 测量结果表明设计的两种吸波结构均能有效吸收入射电磁波。

参考文献:

- [1] Ronald L F, Michael T M. Reflection Properties of the Salisbury Screen [J]. IEEE Trans. Antennas Propag., 1988, 36(10): 1443-1454.
- [2] Simms S, Fusco V. Thin Radar Absorber Using Artificial Magnetic Ground Plane [J]. Electronics Letters, 2005, 41(24): 1311-1333.
- [3] Liang T, Li L, Bossard J A, et al. Reconfigurable Ultra-thin EBG Absorbers Using Conducting Polymers [J]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2006, 28(6): 204-207.
- [4] Engheta N. Thin Absorbing Screens Using Metamaterial Surfaces [C]//IEEE Trans. Antenna Propag. Society(AP-S) Int. Symp. and USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Antonio, TX, USA, 2002: 16-21.
- [5] Kern D J, Wemer D H. A Genetic Algorithm Approach to the Design of Ultra-thin Electromagnetic Band-gap Absorbers [J]. Microwave and Optical Technology Lett., 2003, 38(1): 61-64.
- [6] 邢丽英, 蒋诗才, 李斌太. 含电路模拟结构吸波复合材料[J]. 复合材料学报, 2004, 21(6): 27-33.
- [7] Gao Q, Yin Y, Yan D B, et al. Application of Metamaterials to Ultra-thin Radar-absorbing Material Design [J]. Electronics Letters, 2005, 41(18): 3-4.
- [8] Li Y Q, Fu Y Q, Yuan N C. Characteristics Estimation for High Impedance Surfaces Based Ultra-thin Radar Absorber [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2009, 51(7): 1775-1778.
- [9] Langley R J, Parker E A. Equivalent Circuit Model for Arrays of Square Loops [J]. Electronics Letters., 1982, 18(7): 294-296.
- [10] Yang J, Shen Z X. A Thin and Broadband Absorber Using Double-square Loops [J]. IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett, 2007, 6: 388-391.