

文章编号 1005-0388(2010)02-0353-05

# 基于 AMC 的吸波材料及其在 微带天线中的应用

李有权 张光甫 袁乃昌

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘要** 研究了基于 AMC 结构的吸波材料在微带天线 RCS 减缩中的应用。给出了基于 AMC 结构吸波材料的表面阻抗的计算公式,并实际加工了吸波材料样品,分析了反射相位与表面反射系数之间的关系。将这种超薄 AMC 吸波材料应用于微带天线,实验结果表明:微带天线 RCS 得到有效降低,同时天线辐射性能得到保持,仅前向增益下降了 0.9 dB。

**关键词** 人工磁导体;吸波材料;微带天线;RCS 减缩

**中图分类号** TM15

**文献标志码** A

## 1. 引言

为了获得性能优异的吸波材料,世界各国都在致力于开发基于新型吸波机制的吸波材料。ENG-HEITA N 首次提出用 Metamaterial 来获得超薄吸收材料的思想<sup>[1]</sup>,用含损耗的频率选择表面(HZFS-SS)实现了超薄吸收材料<sup>[2-4]</sup>,但设计方法较为复杂,很难在实际当中得到应用。文献[5]采用在高阻表面上加载集总电阻的方法实现超薄吸波,该方法结构简单,具有较强的实际性。

微带天线因为其有轻、薄及容易共形的特点,在各种作战平台上得到广泛的应用。降低微带天线 RCS 对于降低整个作战平台的 RCS 具有十分重要的意义。传统的微带天线 RCS 减缩方法如采用损耗衬底和加终端匹配等<sup>[6-8]</sup>,都是以天线的辐射性能降低为代价的。本文首先研究了基于 AMC 结构的吸波材料的设计,给出了设计方法并对实验结果进行了分析。然后,将这种超薄吸波材料应用于微带天线,测量结果表明:在所设计的频带内,天线 RCS 得到有效降低,而天线性能只是稍有下降,仅前向增益下降了 0.9 dB,为微带天线的减缩提供了一种新的方法。

## 2. 基于 AMC 结构吸波材料的设计

高阻电磁表面的提出,在物理上找到实现理想

磁导体(PMC)特性的途径。高阻电磁表面具有同相反射的特点,在其等效并联 LC 电路的谐振频率上,可以等效看作是 PMC。虽然这种结构在物理上并不是真正意义上的理想磁导体,但是在某一频率上会表现出与 PMC 相同的特性,因此,满足这一特性的结构称作人工磁导体(Artificial Magnetic Conductor: AMC)

基于 AMC 材料所设计的吸波材料包括两个部分,具有同相反射特性的 AMC 结构和损耗层。在介质基板表面周期排列的方形贴片,底板为金属板,可以实现 AMC 结构,直接将集总电阻加载在贴片之间实现损耗层。这种结构仍然基于 Salisbury 屏原理<sup>[9]</sup>,但是由于 AMC 同相反射特性,不存在 1/4 波长厚度的限制,可以实现超薄特性。选择适当的电阻阻值可以在一定频段内较好地吸收入射电磁波。如图 1 所示为基于 AMC 结构吸波材料示意图。

对于厚度为  $h$  的介质板,底板为金属,表面为周期方形贴片阵列,当电磁波垂直入射到其表面时,表面阻抗可以等效为容性的贴片阵和感性的介质板并联,可表示为<sup>[10]</sup>

$$Z_{AMC} = \frac{Z_g Z_d}{Z_g + Z_d} \quad (1)$$

收稿日期:2009-07-04

基金项目:自然科学基金资助项目(No. 60871069)

联系人:李有权 E-mail:youquanli2007@163.com

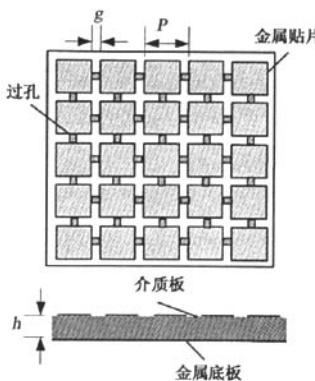


图 1 基于 AMC 结构的吸波材料

式中:  $Z_g$  为贴片阵等效电容;  $Z_d$  是介质板等效电感。贴片阵的等效电容为

$$Z_g = \frac{\eta_{\text{eff}}}{j2\alpha} \quad (2)$$

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

式中: 有效介电常数  $\epsilon_{\text{eff}} = (\epsilon_r + 1)/2$ ; 有效波阻抗为  $\eta_{\text{eff}} = \eta_0 \sqrt{\epsilon_r}$ ; 有效波数为  $k_{\text{eff}} = k_0 \sqrt{\epsilon_r}$ 。

当电磁波垂直入射到厚度为  $h$  的介质板时, 其输入阻抗为

$$Z_s = j \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \tan(\alpha \sqrt{\epsilon \mu} h) \quad (4)$$

在谐振频率, 输入阻抗的虚部趋近于无穷大, 此时这种结构可以等效为 AMC, 如果在其表面放置电阻片, 就可以实现吸波效果, 整个吸波结构输入阻抗为

$$\frac{1}{Z_{\text{imp}}} = \frac{1}{Z_{\text{AMC}}} + \frac{1}{R_s} \quad (5)$$

对于垂直入射波, 其表面反射系数为

$$R = \frac{Z_{\text{imp}} - \eta_0}{Z_{\text{imp}} + \eta_0} \quad (6)$$

所设计的 AMC 吸波材料采用如下参数: 介质板厚度为 3 mm, 介电常数为 3.5, 方形贴片宽度为 8 mm, 贴片间缝隙宽度为 0.5 mm。我们制作了两块同样尺寸的 AMC 结构, 整体结构大小为 138.6 mm  $\times$  138.6 mm, 其中一块在方形贴片间加载阻值为 620  $\Omega$  的集总电阻。

图 2 所示为 AMC 反射相位及吸波材料表面反射系数的测量结果。从图中可以看出, AMC 反射相位在  $\pm 60^\circ$  的频带 4.52~5.24 GHz, 其带宽为 720 MHz, 其中心频率为 4.88 GHz。AMC 吸波材料表

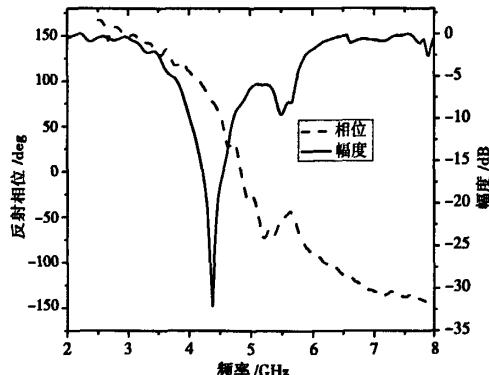


图 2 测量的 AMC 反射相位与表面反射系数

面反射系数低于  $-10$  dB 的频段为 4.01~4.73 GHz, 带宽为 720 MHz, 中心频率为 4.35 GHz。从测量结果发现 AMC 吸波频带基本与其表面反射相位在  $\pm 60^\circ$  的频带相对应, 但是, 其中心频率向低频发生了偏移。这是由于加载集总电阻时会产生寄生电容, 使得吸波频段下移, 而没有与 AMC 同相反射频段相对应, 我们在设计 AMC 结构吸波材料时应考虑到寄生电容的影响。

### 3. 加载 AMC 吸波材料的微带天线及测量结果

#### 3.1 吸波材料在天线中应用的基本原理

微带天线 RCS 可分为结构散射和模式散射, 将基于 AMC 结构的吸波材料用于天线设计, 主要是降低天线的结构散射。加载方法是用吸波材料覆盖天线的金属结构, 此时天线能够正常辐射, 而入射到天线上的电磁波则可以被吸波材料吸收。其主要设计思想为:

- 1) 根据天线的工作频带, 确定吸波材料的工作频带, 吸波材料的工作频带应覆盖天线的工作频带。
- 2) 根据天线的几何尺寸, 选择合适尺寸的 AMC 结构, 确保两个以上单元的 AMC 结构。
- 3) 根据第二节 AMC 吸波材料的设计公式, 计算出吸波材料的工作频带。在设计中必须考虑寄生电容的影响, 会导致吸波频带向低频移动 10% 左右。
- 4) 对所设计的吸波材料进行测量, 如果吸波频带能够覆盖天线的工作频带, 则设计成功, 否则需要调整 AMC 的结构参数。

#### 3.2 加载 AMC 吸波材料的微带天线

加载 AMC 吸波材料的微带矩形贴片天线如图 3 所示。它们共用相同的基板, 介质板厚度为 3

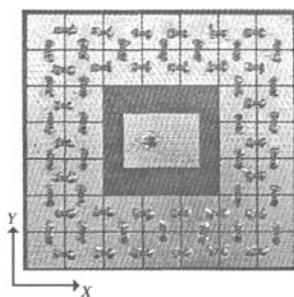


图3 加载AMC吸波材料的微带天线

mm,介电常数为3.5,微带天线采用同轴馈电方式,AMC吸波材料围绕在辐射贴片四周,AMC参数与第二节所描述的参数相同,微带天线贴片尺寸为16.8 mm×12.4 mm,在微带贴片与AMC吸波结构之间适当留出距离,以减小对天线的影响。加载AMC吸波材料的天线整体尺寸为61.2 mm×61.2 mm。AMC吸波材料的工作频带覆盖了天线的工作频带。

### 3.3 测试结果及讨论

在天线表面加载吸波材料后,对微带天线的辐射性能会产生一定影响,我们主要从实验的角度分析其对天线性能的影响,主要分析了反射系数,方向图及RCS三个参数。

加载AMC吸波材料微带天线与参考天线的反射系数测量结果如图4所示,加载吸波材料后微带天线反射系数的带宽基本没有影响,只是深度有差异,这说明AMC吸波材料对其天线的反射系数影响较小。

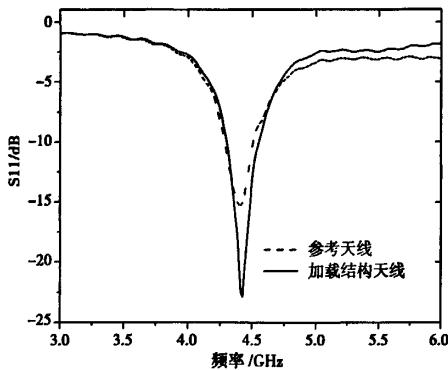
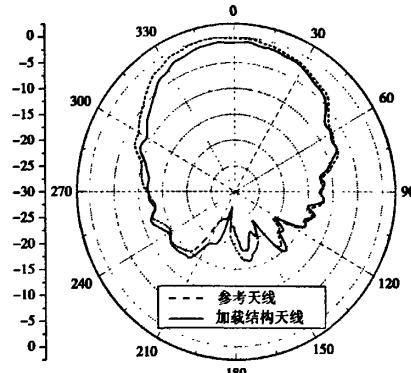


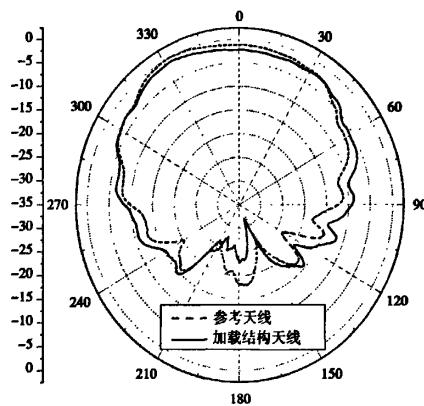
图4 天线反射系数比较

在微波暗室中对天线方向图进行了测量,测量频点为4.35 GHz,为了便于比较,对测量结果进行

了归一化处理,如图5(a)和(b)所示。



(a) E面方向图



(b) H面方向图

图5 天线方向图比较

从测量的E面和H面方向图来看,加载了AMC吸波材料后,对E面和H面的影响基本一致,即微带天线方向图在各个方向幅值稍有降低,但降低幅度不大。天线前向增益下降了0.9 dB。这是由于吸波材料对各个方向均有吸波效果。

为了验证吸波材料对天线结构散射的降低效果,在测量时两个天线都加载了匹配负载。由于天线整体尺寸较小,考虑到整个测量系统精度,采用如下测量方式:将两个喇叭天线平排放置,中间放置吸波材料以减小天线间的耦合,把贴片天线放置在距离喇叭100 cm处,此时入射波可近似看作平面波。在微波暗室中对两个天线的后向散射进行了测量,电磁波入射方向垂直于天线表面,电场方向与x方向平行。

加载吸波材料后微带天线RCS减缩结果如图6所示,可以看出在整个频带内RCS值均有减缩,在4.1~4.83 GHz频带内,天线的RCS降低了

10dB 以上, RCS 减缩频段与 AMC 吸波材料的工作频段一致, 说明 RCS 的减缩是因为 AMC 吸波材料的缘故。图 6 中 RCS 减缩曲线在 4.5 GHz 周围存在一个突起, 这是因为天线工作在这个频段, 虽然加载了匹配负载, 但是模式散射依然存在一些影响。从测量结果可以看出吸波材料能够有效降低微带天线的结构散射。

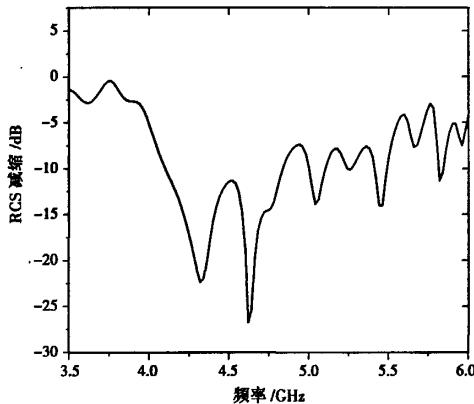


图 6 加载 AMC 吸波材料后天线 RCS 减缩

## 4. 结 论

周期排列的金属贴片阵在谐振频率可以实现人工磁导体特性, 在贴片间加载集总电阻能够吸收入射电磁波, 实现超薄吸波材料, 其吸波频段对应于同相反射相位在  $\pm 60^\circ$  的区域。在实际设计时由于寄生电容, 吸波频段会往低频偏移。将这种超薄吸波材料应用于微带天线中, 能够有效降低微带天线的 RCS, 同时微带天线辐射特性影响较小, 仅前向增益下降 0.9dB。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] KERN D J, WERNER D H. A genetic algorithm approach to the design of ultra-thin electromagnetic bandgap absorbers [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 38(1): 61-64.
- [3] 陈 良, 徐彬彬, 张世鸿, 等. 电阻贴片频率选择表面(FSSR)的吸波性能研究[J]. 电波科学学报, 2006, 21(4): 548-552.  
CHEN Liang, XU Bin-bin, ZHANG Shi-hong, et al. Absorbing performance of frequency selective surface with resistance patch [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(4): 548-552. (in Chinese)
- [4] 徐 欧, 朱 敏, 徐金平, 等. 双层方环可电控 FSS 吸波屏设计和实验研究[J]. 电波科学学报, 2009, 24(5): 837-843.  
XU Ou, ZHU Ming, XU Jinping, et al. Design and measurement of active absorber using the double layer square loop FSS[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009, 24(5): 837-843. (in Chinese)
- [5] GAO Q, YIN Y, YAN D B, et al. Application of metamaterials to ultra-thin radar-absorbing material design[J]. Electronics Letters, 2005, 41(17): 936-937.
- [6] JACKSON D R. The RCS of a rectangular microstrip patch in a substrate-superstrate geometry [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1990, 38(1): 2-8.
- [7] 杨 超, 阮颖铮, 冯 林. 微带天线 RCS 缩减技术及分析方法[J]. 电波科学学报, 1994, 9(4): 52-56.  
YANG Chao, RUAN Yingzheng, FENG Lin. RCS Reduction Techniques and Analysis Method of Microstrip Antennas[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1994, 9(4): 52-56. (in Chinese)
- [8] VOLAKIS J L, ALEXANIAN A, JIN J. Broadband RCS reduction of rectangular patch by using distributed loading[J]. Electron Letters, 1992, 28(25): 2322-2323.
- [9] TRETYAKOV S A, SIMOVSKI C R. Dynamic model of artificial reactive impedance surfaces[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2003, 17(1): 131-145.
- [10] FANTE R L, MCCOMACK M T. Reflection properties of the salisbury screen[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1988, 36(10): 1443-1445.

## 作者简介

李有权 (1980—),男,四川人,国防科技大学电子科学与工程学院博士生。研究方向为电磁带隙结构,吸波材料,天线设计等。



张光甫 (1974—),男,四川人,国防科技大学电子科学与工程学院讲师。研究方向为超宽带雷达以及高功率微波技术等。



袁乃昌 (1965—),男,安徽人,国防科技大学电子科学与工程学院电子科学与技术系主任,教授,博士生导师,电磁场与微波技术专业学术带头人。在国内外一级学术期刊发表学术论文 100 余篇,出版专著、教材 5 部。目前主要从事目标与环境特性、超宽带技术及光子晶体等方面的研究。

## Ultra-thin absorber based on the AMC structure and its application to the microstrip antenna

LI You-quan ZHANG Guang-fu YUAN Nai-chang

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

**Abstract** In this paper, the application of artificial magnetic conductor(AMC)based absorbing material to microstrip antenna is investigated. Simple analytical formulas for the input impedance of AMC RAM are presented and, samples of AMC based absorber are fabricated. The relationship between the reflection phase of AMC and the reflection coefficient of RAM is analyzed. This ultra-thin AMC RAM is applied to microstrip antenna, and the measured results show that the structural RCS of antenna is reduced effectively and the radiation performance of antenna is kept, with the gain decrease by 0.9 dB.

**Key words** artificial magnetic conductor(AMC); absorbing material; microstrip antenna; RCS reduction

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于2006年整合合并微波EDA网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和ADS、HFSS等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于2004年,10多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波EDA网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>