

加载复合平面的缝隙天线 RCS 特性研究

谭 渊, 袁乃昌, 杨 勇, 付云起

(国防科学技术大学电子科学与工程学院微波中心, 湖南 长沙 410073)

摘要: 分析了人工磁导体和理想电导体复合表面对入射电磁波反射相位相差 180° 的特点。通过合理设计两个表面的比例, 可以实现复合平面结构后向电磁散射的抑制。将该复合表面应用于缝隙天线的设计, 达到了在不影响天线辐射效能的同时减少雷达反射截面积 (radar cross-section, RCS) 的目的。实测结果表明, 加载复合表面的缝隙天线在设计频带内的 RCS 减少了 $10\sim 15$ dB, 进一步验证了复合平面对后向电磁散射的抑制效果。

关键词: 缝隙天线; 雷达反射截面积; 人工磁导体; 反射相位

中图分类号: TN 954.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.10.08

Study on RCS of slot antenna loaded composite surface

TAN Yuan, YUAN Nai-chang, YANG Yong, FU Yun-qi

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

Abstract: The character that the incident wave from the composite surface combined by artificial magnetic conductor (AMC) and perfect electric conductor (PEC) has an 180° phase-shift is studied. By designing the proportion of two surfaces, the composite surface will show obvious RCS reduction in backward direction. Then the composite surface is used on a slot antenna to reduce the RCS, and the radiation of the antenna will not be changed. The measured result shows that the RCS of antenna loaded composite surface reduces $10\sim 15$ dB in the designed band, so the backward RCS reduction of the composite surface is validated.

Keywords: slot antenna; radar cross-section (RCS); artificial magnetic conductor (AMC); reflected phase

0 引言

近年来, 电磁带隙 (electromagnetic band-gap, EBG) 结构被广泛应用于缝隙天线的设计。通过抑制天线中表面波的传播, 可以提高天线增益和效率^[1-2], 降低副瓣电平^[3-4] 及阵列天线中的互耦^[5-7]。同时, EBG 结构也被应用于目标的电磁散射特性控制。比如在 EBG 结构中嵌入集总电阻或损耗材料, 利用其同相反射特性, 可以实现低剖面的雷达吸波材料^[8-11], 并有效减少雷达反射截面积 (radar cross-section, RCS)^[12]。最近, 文献^[13]报道了一种用于 RCS 减缩目的的棋盘结构表面, 由人工磁导体 (artificial magnetic conductors, AMC) 和理想电导体 (perfect electric conductors, PEC) 复合而成, 其基本原理就是 AMC 和 PEC 两部分的电磁反射相互抵消, 形成后向的弱反射。但是, 由于未引入损耗材料, 实际上电磁能量已被反射到其他方向。该方法相比于利用不规则辐射单元降低天线 RCS 的方法^[14] 更加简单有效。

本文在文献^[13]的基础上, 研究了不同 AMC 和 PEC 结

构的组合形式, 分析了它们的电磁散射的特点和对后向电磁反射的抑制效果, 并将其用于缝隙天线的设计, 在提高缝隙天线增益和效率的同时减小 RCS。测试结果表明, 缝隙天线中引入复合表面能在设计频带实现很好的 RCS 缩减效果。

1 AMC 结构的特性分析

众所周知, EBG 结构是由周期微带结构的金属焊盘和垂直到地的过孔组成。对于普通的入射平面波, 其反射相位为 0 。因此在某一特定频段, 可以把 EBG 结构看作是理想的磁导体。但是, EBG 结构里的到地过孔对于反射相位的改变没有直接的影响, 相反对于横磁性 (transverse magnetic, TM) 入射波在没有过孔的情况下, 其角频率稳定度更好^[15-16]。图 1 是没有过孔的 AMC 结构示意图, 及其反射相位随频率变化的曲线。印制 AMC 结构的板材的介电常数为 2.65, 厚度为 1.5 mm, 其中的正方形金属块的边长为 10 mm, 间距为 0.5 mm。可以看出, 在 3.35 GHz 的时候, 反射相位为 0 , 这意味着该结构在此频率为理想的磁导体 (perfect magnetic conductors, PMC)。

收稿日期: 2011-01-06; 修回日期: 2011-03-13。

基金项目: 国家自然科学基金 (60871069) 资助课题

作者简介: 谭渊 (1984-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为微波干扰与抗干扰技术、微波电路。E-mail: tango2002@sohu.com

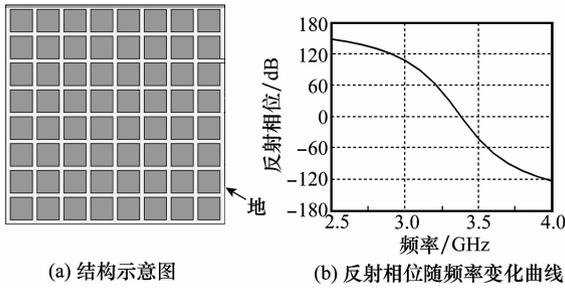


图 1 周期排列的 AMC 结构示意图以及反射相位随频率变化曲线

上述结果仅仅说明了一个平面入射波的反射相位的变化,然而 AMC 结构自身的散射特性在 RCS 的研究中也必须考虑。除了反射相位的差别,AMC 结构的散射特性应该与金属板类似。图 2 给出了高频仿真软件(high frequency simulation software, HFSS)计算的 AMC 结构和与其相同尺寸金属板(420 mm×420 mm)的 RCS。可以看出,频率为 3.35 GHz 和 2.7 GHz 时,两者的 RCS 基本相同。

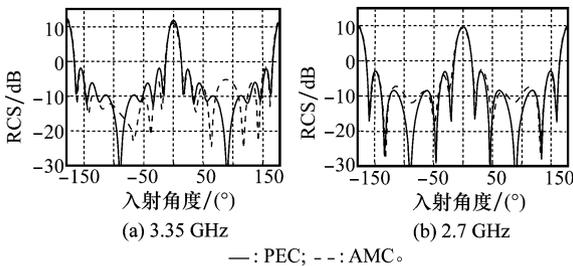


图 2 AMC 结构与相同尺寸金属板的 RCS 对比

2 AMC+PEC 复合表面的散射分析

由以上分析可以看到,AMC 结构和理想金属导体都是很好的反射体,但是其反射相位不同。如果这两种表面的反射相位相差 180°,那么它们的反射将会相互抵消。AMC 和 PEC 复合表面材料正是基于这种原理实现 RCS 缩减的。要达到理想的抵消效果,两种材料的反射幅度应相等,因此 AMC 和 PEC 的几何布局以及各占的比例将会对 RCS 的缩减效果产生重要影响。下面将讨论不同结构的 AMC 与 PEC 的组合方式。

2.1 简单的 AMC+PEC 组合

图 3 为最简单的 AMC+PEC 组合结构。当平面波入射到一整块金属面时,其后向反射是最强的。如果金属面部分被 AMC 结构覆盖后,两种不同表面反射的电磁波将会反相对消。图 3 所示的方形金属面的一半被 AMC 结构覆盖。

令入射平面波的电场方向沿 X 轴,频率设为 3.35 GHz,金属面仍然为 420 mm×420 mm 的正方形。图 4 给出了 XZ 面($\pi=0^\circ$)RCS 的计算结果。可以看到,在后向方向复合表面比金属面的 RCS 降低了很多。当入射波频率设为 2.7 GHz 时,复合表面和金属面的 RCS 基本相同,这是因为

AMC 表面的反射相位在 2.7 GHz 时大约为 140°,因此两个表面反射的电磁波无法对消。

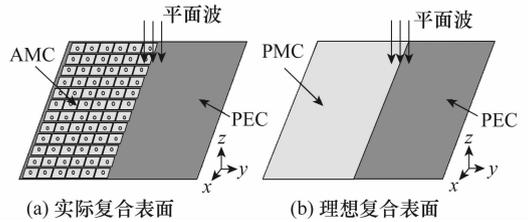


图 3 AMC+PEC 的复合表面

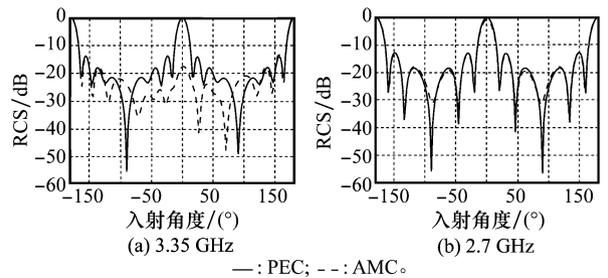


图 4 X 极化入射波在 $\pi=0^\circ$ 面的复合表面与金属面 RCS 计算结果

AMC 结构中的方形金属块的尺寸在 3.35 GHz 时大概为 $4.7\lambda \times 4.7\lambda$,如果用实际的金属块阵列进行计算将非常耗时。为简化计算,可以将 AMC 结构部分用 PMC 边界条件来近似,在 HFSS 仿真时可以通过设置理想磁边界来实现,不过这样处理只是针对所感兴趣的频率(3.35 GHz)。图 5 给出了相应的 RCS 计算结果。图中的曲线反映出理想磁边界条件可以有效地模拟 AMC 结构。

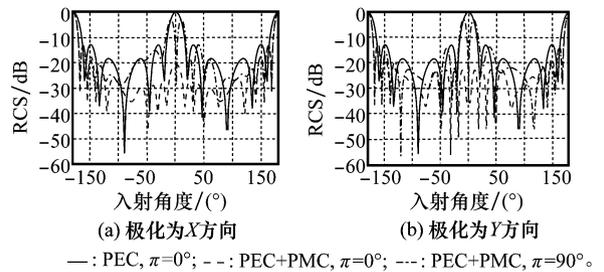


图 5 金属和 PEC+PMC 组合结构在不同极化下的 RCS

从图 5 中 RCS 曲线可以得知,复合表面的 RCS 特性在不同极化入射波的情况下变化不大,但是对于 $\pi=0^\circ$ 和 $\pi=90^\circ$ 两个不同面的情况,结果完全不同。当 $\pi=0^\circ$,也就是在后向方向,RCS 的缩减很明显;但当 $\pi=90^\circ$ 时的某些角度,RCS 增大了,并在 $\pm 15^\circ$ 时出现了峰值。这是因为在 $\pi=90^\circ$ 的平面,可以认为复合表面是一个间距很大而且相位差为 180°的两元阵列。总场在法线方向为 0,主瓣指向的角度由相位差和阵列间距决定^[13]。而在 $\pi=0^\circ$ 的平面,由于两部分之间没有相位差,因此在所有的角度都可以对消。

RCS 的缩减能力取决于 PMC(或者 PEC) 占总平面的比例。如果 PMC(或者 PEC)的面积小于总面积的一半,那么由于 PMC 和 PEC 反射的场的幅度不相等,会减小对消。

定义 R 为 PEC 面积与总面积的比值,即

$$R = \frac{S_{PMC}}{S_{plate}} \quad (1)$$

在以上分析的情况中, $R=0.5$ 。图 6 给出了 $R=0.4$ 和 $R=0.3$ 的情况。可以看出,后向 RCS 随着 PMC 面积的减少而增大,当 PMC 的面积等于 PEC 的面积时,得到最好的 RCS 减缩效果。

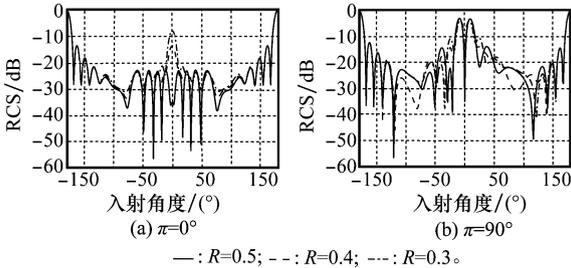


图 6 金属和 PEC+PMC 组合结构在不同 R 值下的 RCS

2.2 用于缝隙天线中的环形结构

2.1 节中介绍的结构虽然简单,但是安装在缝隙天线上不是最理想。为了适合缝隙天线的特点,本文设计了另一种复合表面,即如图 7 所示的环形结构,PMC 表面覆盖金属面的外环区域,中央的 PEC 部分为宽度为 w 的正方形。将波导的缝隙开在 PEC 的中间部分,不会影响复合表面电磁波的散射。

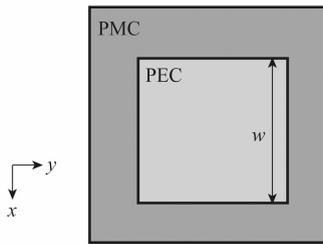


图 7 环形结构的 PMC 与 PEC 组合表面

图 8 计算了环形结构的复合表面结构分别在 X 和 D 极化情况下的 RCS。由于阵列的影响,在 $\pi=0^\circ$ 和 $\pi=90^\circ$ 的平面上都出现了一些波峰,但峰值比前两种情况要小很多。另外,表 1 还计算了不同填充面积(R 值)对环形结构复合表面 RCS 的影响。可以看出,当 $R=0.5$ 时,RCS 减缩最多,这与前面的分析很吻合。

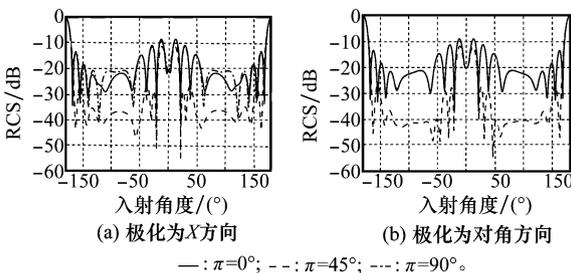


图 8 环形结构的复合表面 RCS

表 1 不同 R 值下环形结构的 RCS 缩减值

R	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8
RCS 缩减量/dB	3.65	11.7	20.75	13.2	4.25

3 实际测试结果

RCS 缩减测量的测试示意图如图 9 所示,测试过程在微波暗室中进行,以避免杂散反射带来的影响。两个喇叭天线分别作为收发使用,并分别连接到矢量网络分析仪的两个端口。为减小两个喇叭天线之间的互耦,在两个天线之间放置吸波材料,喇叭之间的距离大概为 10 cm。两个喇叭之间存在小角度,此时入射电磁波近似为垂直入射。将待测目标放置在两个喇叭之前,距离大概为 50 cm,入射电磁波可近似看作平面波。

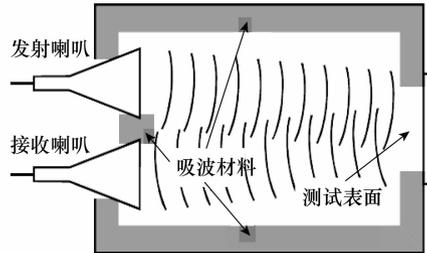


图 9 RCS 缩减测试示意图

图 10 是按照以上分析制作的 $R=0.5$ 的环形复合表面结构,将其安装在波导缝隙天线上,并在暗室里对其 RCS 和辐射方向图分别进行了测量。外环为边长 120 mm 环形 AMC 结构,内环为边长 85 mm 的方形 PEC。零反射相位设计在 7 GHz 左右,因此金属贴片大小为 6.8 mm,周期 7.2 mm,介质板厚度为 2 mm,介电常数为 2.65。考虑到成本问题,选择在 AMC 结构上加载双面覆铜板,其中双面覆铜板厚度为 0.5 mm,则 AMC 结构与 PEC 结构不在同一平面。由于此时波长为 42.86 mm,覆铜板厚度远小于谐振波,则其厚度为反射相位的影响可以忽略,近似认为两种结构在同一样平面上。

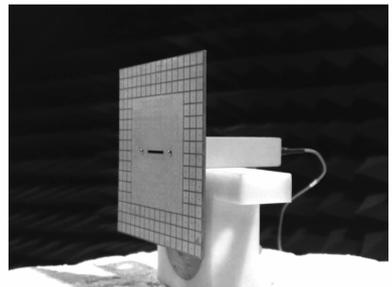


图 10 加载复合表面的波导缝隙天线

从图 11 的测试结果可以看出,加载复合表面缝隙天线的 RCS 在所设计频率附近有明显的缩减,并在 7.05 GHz 达到峰值。由此可以说明,复合结构确能在特定频段对入射波产生后向的抑制作用,而且通过改变 AMC 结构的尺

寸可以得到所需要的抑制频段。同时,天线的辐射方向图也和只加载 AMC 表面时相似。由此可以说明,复合表面的引入使得天线在提高增益和效率的同时,还缩减了 RCS。

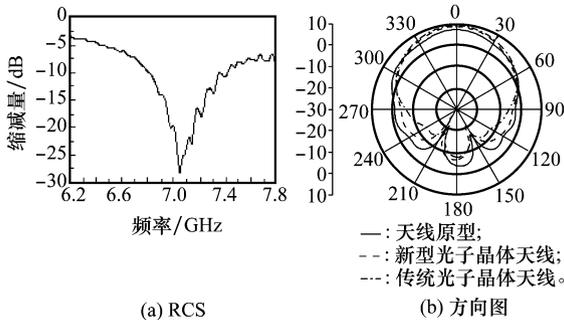


图 11 天线 RCS 和方向图测试结果

4 结 论

文章分析了人工磁导体和理想电导体复合表面对入射电磁波反射相位相差 180° 的特点,并对不同几何结构的 AMC 与 PEC 复合表面在缩减 RCS 方面的能力进行了计算,得出了当 $R=0.5$ 时缩减效果最好的结论。最后将环形结构应用于缝隙天线的设计,实际测试结果表明,天线的 RCS 在设计频带缩减了 $10\sim 15$ dB,并且还能够改善天线的辐射方向图。

参考文献:

[1] Arnand E, Chantalat R, Monediere T. Performance enhancement of self-polarizing metallic EBG antenna [J]. *IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters*, 2010, 20(9): 538 - 541.

[2] Maagt P, Gonzalo R, Vardaxoglou Y C, et al. Electromagnetic band gap antennas and components for microwave and (sub) millimeter wave applications [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2003, 51(10): 2667 - 2677.

[3] Fu Y Q, Yuan N C. EBG-based circular waveguide rod arrays with improved scanning characteristics [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, 20(8): 705 - 707.

[4] Arnaud E, Chantalat R, Koubeissi M. Global design of an EBG antenna and meander-line polarizer for circular polarization [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2010, 20(9): 215 - 218.

[5] Fu Y Q, Zheng Q R, Gao Q, et al. Mutual coupling reduction between large antenna arrays using electromagnetic bandgap (EBG) structures [J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2006, 20(6): 819 - 825.

[6] Bertuch T. Comparative investigation of coupling reduction by EBG surface for quasi-static RCS measurement systems [J]. *Electric Letters*, 2006, 5(1): 231 - 234.

[7] Zeev I, Reuven S, Reuven B. Micro-strip antenna phased array with electromagnetic band-gap substrate [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2004, 52(6): 1446 - 1453.

[8] 郑秋容,付云起,李有权,等.高阻表面在缝隙相控阵天线中的消除盲点研究 [J]. *系统工程与电子技术*, 2007, 29(3): 333 - 337. (Zheng Q R, Fu Y Q, Li Y Q, et al. Blindness removal in slot phase array using high impedance ground plane [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(3): 333 - 337.)

[9] Kern D J, Werner D H. A genetic algorithm approach to the design of ultra-thin electromagnetic bandgap absorbers [J]. *Microwave Optical Technology Letters*, 2003, 38(1): 61 - 64.

[10] Gao Q, Yin Y, Yan D, et al. Application of metamaterials to ultra-thin radar absorbing material design [J]. *Electric Letters*, 2005, 41(17): 936 - 937.

[11] 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): 1175 - 1178.

[12] 凌劲,龚书喜,路宝,等.电磁带隙结构在天线雷达散射截面减缩中的应用 [J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(8): 1225 - 1229. (Ling J, Gong S X, Lu B, et al. Application of electromagnetic bandgap structure in RCS reduction of antenna [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(8): 1225 - 1229.)

[13] Paquay M, Iriarte J C, Ederra I, et al. Thin AMC structure for radar cross-section reduction [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2007, 55(12): 3630 - 3638.

[14] Thakare Y B, Rajkumar. Design of fractal patch antenna for size and radar cross-section reduction [J]. *ITE Microwave Antennas and Propagation*, 2010, 3(2): 175 - 181.

[15] Zhang Y, Hagen J V, Younis M, et al. Planar artificial magnetic conductors and patch antennas [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2003, 51(10): 2704 - 2712.

[16] Hosseini M, Pirhadi A, Hakkak M. A novel AMC with little sensitivity to the angle of incidence using 2-layer Jerusalem cross FSS [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2006, 6(4): 43 - 51.