

宽带雷达散射截面减缩人工磁导体复合结构*

鲁磊¹⁾ 屈绍波^{1)†} 马华¹⁾ 夏颂²⁾ 徐卓²⁾ 王甲富¹⁾ 余斐¹⁾

1) (空军工程大学理学院, 西安 710051)

2) (西安交通大学电子材料与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

(2012年6月15日收到; 2012年7月16日收到修改稿)

提出了宽带雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 减缩人工磁导体复合结构, 通过将多个金属方片周期结构复合, 进一步拓展了其工作带宽. 测试结果表明, 反射率小于 -10 dB 的频段为 $7.7\text{--}13.1$ GHz, 相对带宽为 51.9% . 通过全波仿真研究了其在不同频率的散射特性, 随着频率的增加, 在对角象限平分面上的反射峰逐渐向法线方向靠拢, 但其 RCS 较金属板的后向 RCS 仍减小 -8 dB 以上. 该人工磁导体复合结构具有工作带宽大、设计简单和加工容易等优点, 具有重要的应用前景.

关键词: 宽带, 雷达散射截面减缩, 人工磁导体

PACS: 42.70.Qs, 41.20.Jb, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.62.034206

1 引言

超材料是一类具有奇异电磁特性的新型人工复合材料, 包括负折射率材料^[1] 超材料吸波体^[2] 以及人工磁导体等^[3]. 人工磁导体 (artificial magnetic conductor, AMC) 又称为高阻抗表面, 具有同向反射特性^[3-5]. AMC 已被广泛应用于波导^[6-9]、天线^[10-13]、薄吸波体设计等^[14-18]. 2007年, Paquay 等^[19] 首次提出将 AMC 应用于减小目标 RCS 中, 由于 AMC 的反射相位为 0° , 而理想电导体 (perfect electric conductor, PEC) 的反射相位为 180° , 将两者组合在一起, 并周期排列形成棋盘结构, 可以将垂直入射到其表面的电磁波散射到其他方向, 从而减小后向 RCS. 这种设计方法简单实用, 但是由于 AMC 零相位反射的频段有限, 因而工作带宽很窄, 这限制了其应用. 为拓展其工作带宽, Simms 和 Fusco^[20] 将方片周期金属结构 AMC 与介质片周期结构 AMC 组合成棋盘结构反射屏, 其 RCS 减缩 -10 dB 的工作带宽可以达到 12% . Zhang 等^[21] 用方环周期结构取代 PEC, 并与方片结构 AMC 复合, 即将具有不同单元周期结构的两种

AMC 相复合, 有效地拓展了其工作带宽, 但没有进行试验验证. Fu 等^[22] 采用两种不同大小的方片周期结构 AMC 复合减小后向 RCS, 实验测试结果表明, RCS 减缩 -8.6 dB 的带宽达到 32% , 有效地拓展了工作带宽.

为进一步拓展 AMC 复合结构的工作带宽, 我们将三个不同尺寸大小的金属方片单元结构组合在一起, 形成棋盘结构, 增加了对 AMC 零反射相位频段的调节参数. 仿真和测试结果表明, 该方法可以有效增大 AMC 复合结构的工作带宽, RCS 减缩 -10 dB 的频段可以覆盖整个 X 波段.

2 结构设计

AMC 复合结构的正面图及其单元结构如图 1(a) 所示, 棋盘结构的灰色区域由 AMC 1 组成, 白色区域由 AMC 2 组成, 其边长皆为 $d = 45$ mm. AMC 1 是由一个尺寸较大的金属方片单元周期排列组成, AMC 2 则是由两个不同大小的金属方片组合成一个大的单元, 然后周期排列构成, 其具体尺寸如下: $a_1 = 5.5$ mm, $a_2 = 3$ mm, $b_1 = 5.2$ mm, $b_2 = 2.8$ mm, $b_3 = 2$ mm. AMC 复合结构的侧面图

* 国家自然科学基金 (批准号: 60871027, 60901029, 61071058) 和国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2009CB623306) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn

如图 1(b) 所示, 自上而下, 第一层为复合 AMC 周期金属结构, 其材料设为 PEC, 厚度为 $t = 0.02 \text{ mm}$; 第二层为介质基板, 其相对介电常数为 $\epsilon_r = 2.65$, 厚度 $h = 2 \text{ mm}$; 第三层为接地板, 同样设为 PEC 以阻止电磁波透射. 本文中, 由于我们只关心电磁波垂直入射到 AMC 复合结构表面情况下, 其后向 RCS 的减缩, 而 AMC 单元结构中的接地通孔在电磁波垂直入射情况下是不起作用的, 故在结构设计中去

掉了接地通孔, 从而简化了仿真过程. 采用基于时域有限差分的商业电磁软件 CST 微波工作室, 对 AMC 复合结构进行全波仿真. 将 AMC 1 和 AMC 2 组成 7×7 的阵列, 总尺寸大小为 $315 \times 315 \text{ mm}^2$. 电磁波垂直入射到 AMC 复合结构的表面, 其中电场沿着 $+x$ 方向, 磁场沿着 $-y$ 方向, 波矢沿 $-z$ 方向. AMC 复合结构的六个面均设置为开放边界.

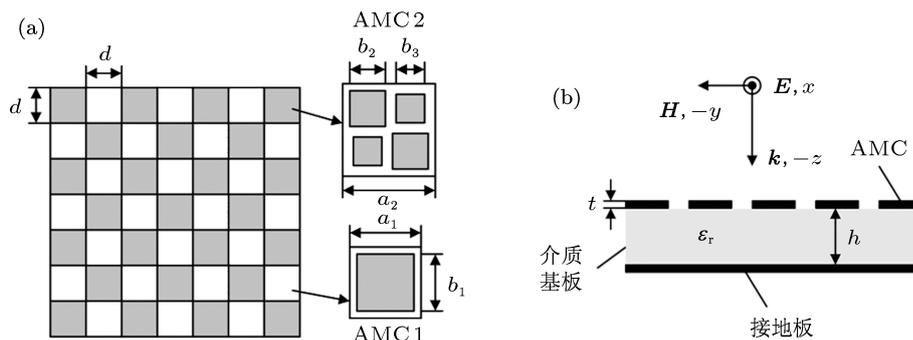


图 1 AMC 复合结构示意图 (a) 正面图及单元结构; (b) 侧面图

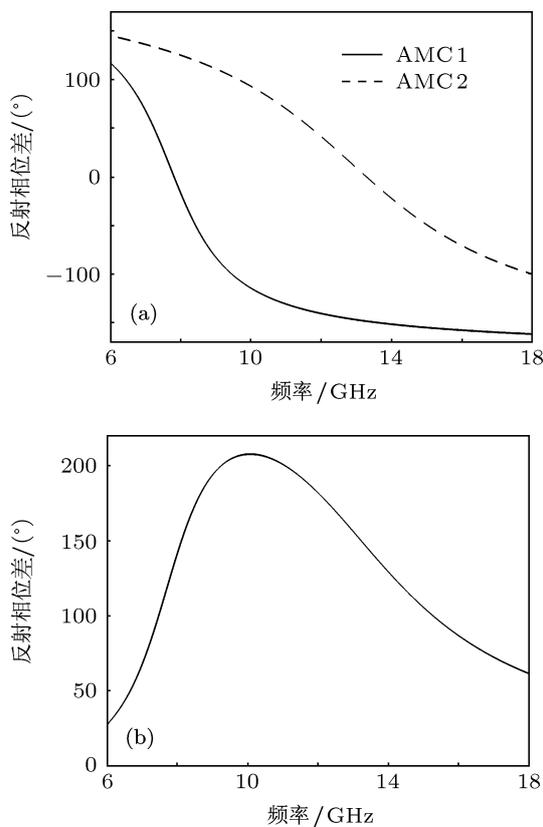


图 2 AMC 1 与 AMC 2 的 (a) 反射相位; (b) 反射相位差

AMC 1 和 AMC 2 的反射相位如图 2(a) 所示,

AMC 1 的反射相位零点为 7.8 GHz, AMC 2 的反射相位零点为 13.3 GHz. 对于 AMC 复合结构, 当 AMC 1 和 AMC 2 反射相位差处于 150° — 210° 之间时, 其后向 RCS 减缩效果较好 [19,22]. AMC 复合结构的反射相位差如图 2(b) 所示, 反射相位差处于 150° — 210° 之间的频段为 8.1—13.3 GHz.

3 仿真结果与分析

AMC 复合结构的后向 RCS 减缩情况如图 3(a) 所示, 其后向 RCS 减缩 -10 dB 的频段为 7.8—13.6 GHz, 约为 5.8 GHz, 相对带宽达到 54.2%, 大大拓展了工作带宽. 图 3(b) 为 AMC 复合结构在 8.5 GHz 的双站 RCS 三维图, 其中 θ 为从 $+z$ 方向旋转到 $+x$ 方向的角度, ϕ 为从 $+x$ 方向旋转到 $+y$ 方向的角度; 垂直入射到 AMC 复合结构表面的电磁波, 被散射到 xz 平面、 yz 平面以及对角象限的平分面上, 而垂直方向的后向 RCS 较小. 由于 AMC 周期金属结构、介质基板以及接地板都是无耗的, 因而 AMC 复合结构只能散射电磁波, 而不能吸收电磁波. 在垂直方向上反射波能量减小, 则在其它方向上的散射波能量就必然会增大.

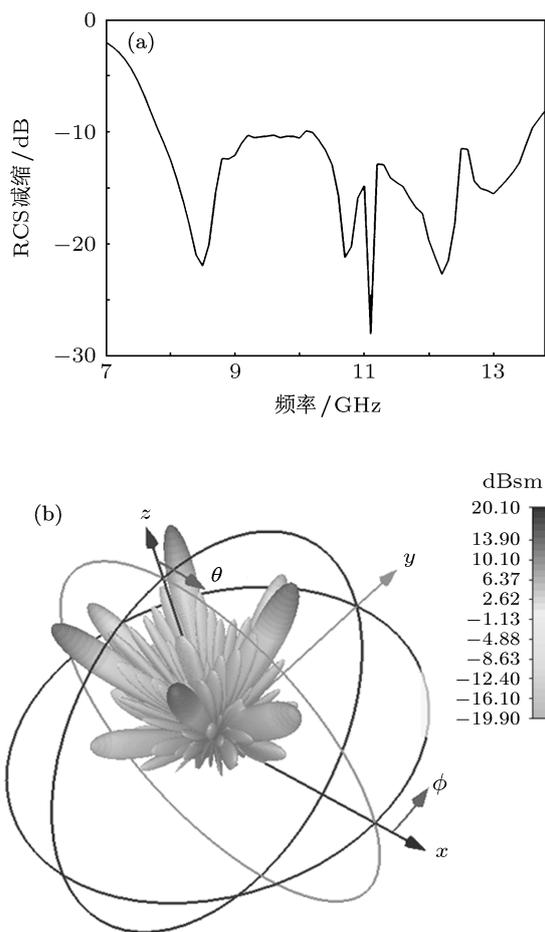


图3 AMC复合结构的 (a) 后向 RCS 减缩; (b) 8.5 GHz 双站 RCS 三维图

AMC 复合结构与相同尺寸大小的金属板在 8.5 GHz 的双站 RCS 曲线如图 4 所示, 其中图 4(a) 为其在 xz 平面的双站 RCS, 图 4(b) 为 $\phi = 45^\circ$ 平面的双站 RCS. 图 4(a) 中, 在 θ 为 0° 时, 金属板的后向 RCS 为 20 dBsm, AMC 复合结构的后向 RCS 为 -2 dBsm, RCS 降低了 22 dB. 在 θ 为 $\pm 52^\circ$ 时出现两个反射峰, 其大小为 6 dBsm, 相比金属板 0° 的后向 RCS 减小 14 dB. 在 $\phi = 45^\circ$ 平面上, θ 为 $\pm 33^\circ$ 时出现了两个反射峰, 其大小为 11.9 dBsm, 相比金属板 0° 的后向 RCS 减小了 8.1 dB. 因此可知, AMC 复合结构将垂直入射的电磁波能量主要散射到四个象限对角线方向上, 而散射到 xz 平面和 yz 平面的能量较小.

AMC 复合结构对不同频率电磁波在 $\phi = 45^\circ$ 平面的双站 RCS 如图 5 所示. 图 5(a) 为 10 GHz 时的双站 RCS, θ 为 0° 时, 金属板和 AMC 复合结构的后向 RCS 分别为 21.5 dBsm 和 10.9 dBsm, RCS 减小了 10.6 dB. 在 θ 为 $\pm 28^\circ$ 和 $\pm 70^\circ$ 时分别出现

了反射峰, 其大小分别为 13.3 dBsm 和 -3.9 dBsm. 图 5(b) 为 11.1 GHz 时的双站 RCS, $\theta=0^\circ$ 时, 金属板和 AMC 复合结构的后向 RCS 分别为 22.4 dBsm 和 -5.6 dBsm, RCS 减小了 16.8 dB. 在 θ 为 $\pm 25^\circ$ 和 $\pm 60^\circ$ 时分别出现了反射峰, 其大小分别为 13.6 dBsm 和 -2.3 dBsm. 图 5(c) 为 12.2 GHz 时的双站 RCS, θ 为 0° 时, 金属板和 AMC 复合结构的后向 RCS 分别为 23.3 dBsm 和 0.6 dBsm, RCS 减小了 22.7 dB. 在 θ 为 $\pm 22^\circ$ 和 $\pm 50^\circ$ 时分别出现了反射峰, 其大小分别为 15.4 dBsm 和 -12.4 dBsm. 图 5(d) 为 13.5 GHz 时的双站 RCS, θ 为 0° 时, 金属板和 AMC 复合结构的后向 RCS 分别为 24.1 dBsm 和 13 dBsm, RCS 减小了 11.1 dB. 在 θ 为 $\pm 20^\circ$, $\pm 44^\circ$ 和 $\pm 86^\circ$ 时分别出现了反射峰, 其大小分别为 15.5 dBsm, -1.1 dBsm 和 -17.1 dBsm. 由图 5 可知, 随着频率的增大, AMC 复合结构的尺寸越来越大, θ 为 0° 两侧对称反射峰逐渐向中间靠拢, 但其 RCS 大小较金属板在 θ 为 0° 的后向 RCS 仍减小 8 dB 以上.

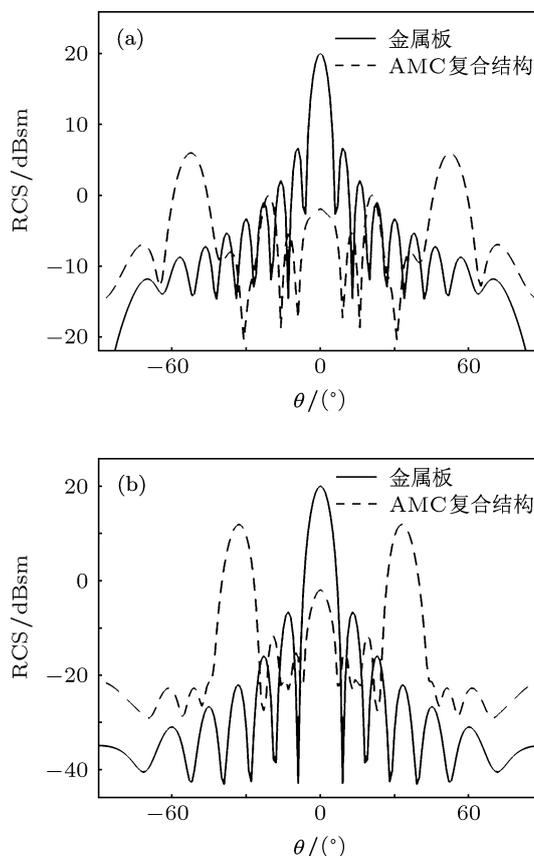


图4 AMC复合结构在 8.5 GHz 的双站 RCS (a) xz 平面; (b) $\phi = 45^\circ$ 平面

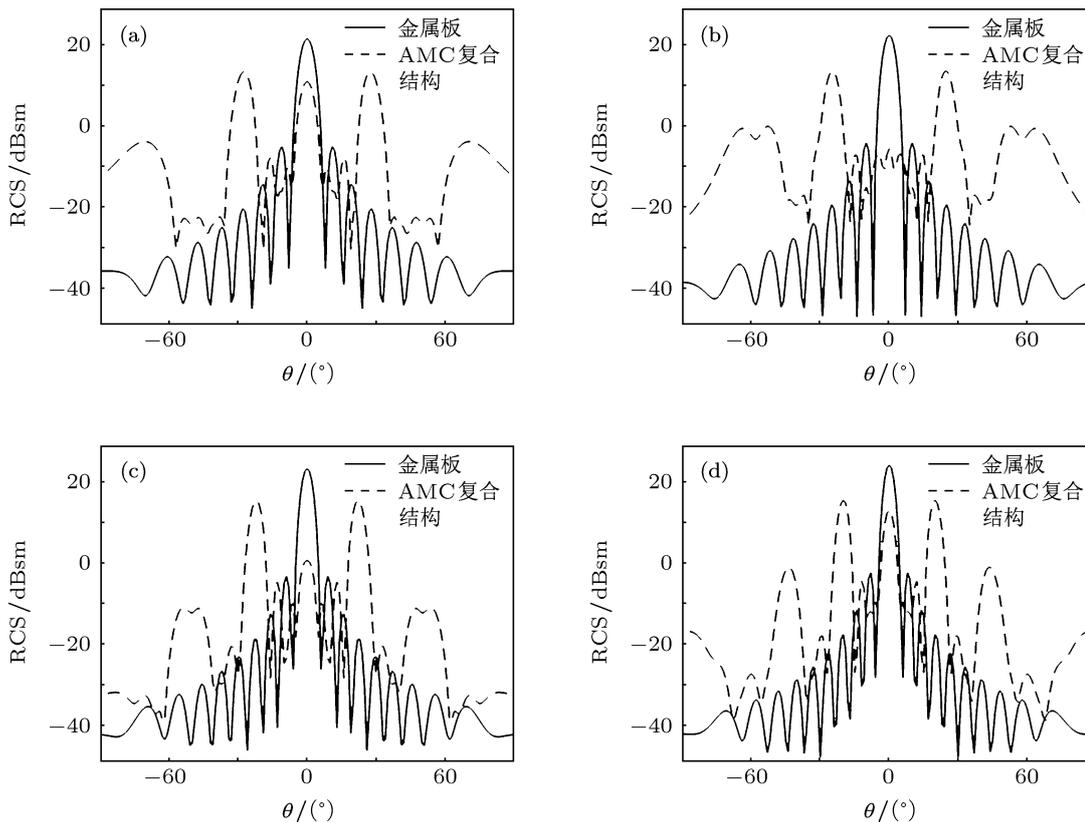


图5 AMC复合结构在 $\phi = 45^\circ$ 平面的双站 RCS (a) 10 GHz; (b) 11.1 GHz; (c) 12.2 GHz; (d) 13.5 GHz

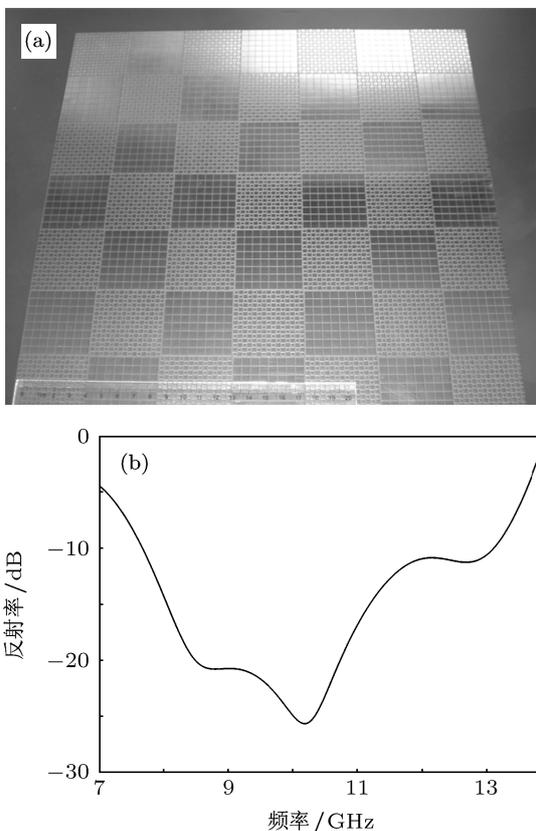


图6 (a) 样品相片; (b) 测试的反射率

4 样品制作与测试

采用印刷电路板技术加工出的 AMC 复合结构样品实物如图 6(a) 所示, 大小为 $315 \text{ mm} \times 315 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}^3$, 其单元尺寸与图 1(a) 中仿真参数相同. 采用 F4B-2 聚四氟乙烯双面板进行样品加工, 其相对介电常数为 2.65, 厚度为 2 mm. 采用近似美国海军研究实验室 (Naval Research Laboratory, NRL) 弓形法在微波暗室中对样品的反射率进行测量. 首先测量出空暗室的回波信号, 利用矢量网络分析仪 (Agilent E8363B) 对空暗室杂波进行时域对消, 减小杂波影响; 然后分别测量样品以及与样品相同大小金属板的反射信号, 将其变换到时域, 用距离门截取高于背景的目标区, 然后逆变换回频域, 通过二者的比对可以计算出样品的反射率, 即为样品的 RCS 减缩值. 样品的反射率曲线如图 6(b) 所示, 在 7.7—13.1 GHz 频段反射率小于 -10 dB , 相对带宽为 51.9%. 比较图 6(b) 与图 3(a) 可以发现, 样品反射率的工作频段以及其随频率变化的趋势与仿真结果是一致的, 两者符合较好; 其中, 测试的反射率与仿真结果值大小的差异, 主要是由于实物

测试中金属板与样品的中心位置是否一致以及样品是否垂直放置等测量误差引起的. 但是, 总体来说, 通过多次测试对比, 测试的数据与仿真结果符合较好, 验证了该 AMC 复合结构对垂直入射电磁波具有较好的后向 RCS 减缩作用.

5 结论

本文中, 为进一步拓展 AMC 复合结构减缩 RCS 的工作带宽, 我们将多个金属方片周期结构相复合, 仿真结果表明: 其后向 RCS 减缩 -10 dB 的

相对带宽达到 54.2%, 有效地拓展了工作带宽; 随着频率的增加, 在对角象限平分面上的反射峰逐渐向 AMC 复合结构平面的法线方向靠拢, 但其 RCS 较金属板的后向 RCS 仍减小 -8 dB 以上. 测试结果表明: 在 7.7—13.1 GHz 反射率小于 -10 dB, 相对带宽为 51.9%, 从而验证了 AMC 复合结构的后向 RCS 减缩作用. 由于本文只考虑电磁波垂直入射的情况, 因而 AMC 单元结构中的接地通孔的作用可以忽略不计, 这大大简化了仿真计算和样品加工作过程. 总之, 该 AMC 复合结构工作带宽大, 设计思路简单, 加工容易, 具有较强的实用价值.

-
- [1] Chen C H, Qu S B, Xu Z, Wang J F, Ma H, Zhou H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 024101 (in Chinese) [陈春辉, 屈绍波, 徐卓, 王甲富, 马华, 周航 2011 物理学报 **60** 024101]
- [2] Bao S, Luo C R, Zhang Y P, Zhao X P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3187 (in Chinese) [保石, 罗春荣, 张燕萍, 赵晓鹏 2010 物理学报 **59** 3187]
- [3] Sievenpiper D, Zhang L J, Broas R F J, Alexópoulos N G, Yablonovitch E 1999 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **47** 2059
- [4] Simovski C R, Maagt P, Tretyakov S A 2004 *Electron. Lett.* **40** 92
- [5] Simovski C R, Maagt P, Melchakova I V 2005 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **53** 908
- [6] Yang F R, Ma K P, Qian Y, Itoh T 1999 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **47** 2092
- [7] Chang C C, Qian Y X, Iton T 2003 *Electromagn. Res.* **4** 211
- [8] Li D C, Boone F, Bozzi M 2008 *IEEE Microw. Wireless Components Lett.* **18** 743
- [9] Ren L H, Luo J R, Zhang C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 088401 (in Chinese) [任丽红, 罗积润, 张弛 2011 物理学报 **60** 088401]
- [10] Yang F, Rahmat S Y 2003 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **51** 2691
- [11] Wang S, Feresidis A P, Goussetis G, Vardaxoglou J C 2004 *Electron. Lett.* **40** 405
- [12] Feresidis A P, Goussetis G, Wang S 2005 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **53** 209
- [13] Ourir A, Lustrac A, Lourtioz J M 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 084103
- [14] Engheta N 2002 *IEEE Antennas and Propag. Soc. Int. Symp.* San Antonio, TX, August 7, 2002 p392
- [15] Kern D J, Werner D H 2003 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **38** 61
- [16] Tretyakov S A, Maslovsi S I 2003 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **38** 175
- [17] Gao Q, Yin Y, Yan D B, Yan N C 2005 *Electron. Lett.* **41** 936
- [18] Luukkonen O, Costa F, Simovski C R, Monorchio A, Tretyakov S A 2009 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **57** 3119
- [19] Paquay M, Iriarte J C, Ederra I, Gonzalo R, Maagt P 2007 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **55** 3630
- [20] Simms S, Fusco V 2008 *Electron. Lett.* **44** 316
- [21] Zhang Y, Mittra R, Wang B Z, Huang N T 2009 *Electron. Lett.* **45** 484
- [22] Fu Y Q, Li Y Q, Yuan N C 2011 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **53** 712

A broadband artificial magnetic conductor composite structure for radar cross section reduction*

Lu Lei¹⁾ Qu Shao-Bo^{1)†} Ma Hua¹⁾ Xia Song²⁾ Xu Zhuo²⁾
Wang Jia-Fu¹⁾ Yu Fei¹⁾

1) (Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

2) (Electronic Materials Research Laboratory, Key Laboratory of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 15 June 2012; revised manuscript received 16 July 2012)

Abstract

We propose a broadband artificial magnetic conductor (AMC) composite structure for reducing radar cross section (RCS). By combining multiple periodic metal square patches together, we further broaden the working bandwidth of the AMC composite structure. The tested results indicate that the reflection is below -10 dB in a frequency range of 7.7—13.1 GHz, and the relative bandwidth is 51.9%. We study the scattering characteristics of the AMC composite structure at different frequencies by full wave simulation. Reflection peaks in the opposite quadrant bisector of plane shift close to the normal direction with the increase of frequency, but the backscattering RCS of the AMC composite structure is still about -8 dB smaller than that of the metal plate. The AMC composite structure has the advantages of broad working bandwidth, simple design, easy processing, etc, and has important application foreground.

Keywords: broadband, RCS reduction, artificial magnetic conductor

PACS: 42.70.Qs, 41.20.Jb, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.62.034206

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60871027, 60901029, 61071058) and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2009CB623306).

† Corresponding author. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn