

文章编号: 2095-4980(2022)09-0959-06

基于人工磁导体的低 RCS 微带天线设计

任高飞, 徐 勤

(中国船舶重工集团有限公司 第七二四研究所, 江苏 南京 211106)

摘 要: 基于人工磁导体(AMC)的工作机理, 设计了一款工作频率在 X 波段的低雷达散射截面(RCS)微带天线。设计了一种 AMC 单元, 经 X 和 Y 极化波垂直入射在 8.6~14.6 GHz 的频带范围内, 获得 $180^\circ \pm 37^\circ$ 的反射相位差; 将其进行正交排列组成 AMC 棋盘结构的反射屏, 反射屏中 AMC 阵列块由 3×3 的单元组成。仿真结果显示, 该反射屏较相同尺寸的 PEC 板具有更小的后向 RCS, 将此 AMC 结构与工作频点为 10 GHz 的微带天线共面排布, 在保持原有天线良好辐射性能和剖面高度的同时, 在 8.4~14.8 GHz 的频率范围内对两种极化波垂直入射实现了不低于 7.5 dB 的 RCS 缩减量。

关键词: 人工磁导体(AMC); 雷达散射截面(RCS); 微带天线; 极化; 棋盘结构

中图分类号: TN82

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020420

Design of low RCS microstrip antenna based on artificial conductor

REN Gaofei, XU Qin

(No.724 Research Institute of CSIC, Nanjing Jiangsu 211106, China)

Abstract: Based on the working principle of Artificial Magnetic Conductor(AMC), a low Radar Cross Section(RCS) microstrip antenna with operating frequency in X-band is designed. Firstly, an AMC cell is designed, and the reflected phase difference of $180^\circ \pm 37^\circ$ is obtained by the vertical incidence of X and Y polarized waves in the 8.6~14.6 GHz band range. Then, the AMC chessboard structure reflector is composed of 3×3 elements. The simulation results show that the reflector has smaller backward RCS than the Perfect Electric Conductor(PEC) plate with the same size. Finally, the AMC structure is arranged in coplanar with the microstrip antenna at 10 GHz, which maintains the good radiation performance and profile height of the original antenna, and achieves the RCS reduction of not less than 7.5 dB for the vertical incidence of two polarized waves in the frequency range of 8.4~14.8 GHz.

Keywords: Artificial Magnetic Conductor(AMC); Radar Cross Section(RCS); microstrip antenna; polarization; chessboard structure

雷达散射截面(RCS)一直是判断目标隐身性能的重要指标, 随着探测技术和隐身技术的迅速发展, 天线的 RCS 缩减越来越受到人们的重视^[1-2]。近年来, 天线工程师们做了大量的工作来降低天线的 RCS, 例如改变天线的形状^[3-4], 使用频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)、超材料吸波体^[5-6]以及仿生学原理应用^[7]。然而, 由于对结构的依赖性, 它们通常在较窄的带宽内工作或以损失一部分天线增益为代价。2007年, Paquay 首次提出了基于棋盘结构的人工磁导体(AMC)和理想电导体(PEC)组合的平面结构, 这种结构可以将后向能量从垂直入射方向散射到别的方向^[8], 其工作原理是基于无源相消, 该结构的主要特点是在保持天线辐射性能的同时, 具有低剖面 and 易共形等优点, 但是这种结构存在着 AMC 工作带宽的限制, 影响了 RCS 缩减带宽。为了拓展带宽, 研究人员使用 2 个或更多的 AMC 块来替代 AMC 和 PEC 的组合, 这种新的组合方式可以在较宽的频带范围内实现 $180^\circ \pm 37^\circ$ 的有效相位差。在文献[9]中, Fu 使用 2 种不同的贴片形成棋盘结构使得 -10 dB 的相对 RCS 缩减带宽达到了 32%。上述研究表明, 在更宽频带内设计满足有效相位差的 AMC 单元是拓展 RCS 缩减带宽的关键。在现阶段已有的优秀成果中天线工程师们更多地采用 2 种不同形状的单元来实现棋盘结构的组合, 对于使用同一种 AMC 单元的棋盘结构实现宽带 RCS 缩减的研究相对较少。因此, 本文基于 AMC 的工作机理提出了一种降低微带天线带内带外 RCS 的设计方法。

收稿日期: 2020-08-26; 修回日期: 2020-11-09

基金项目: 江苏省第五期“333工程”高层次人才培养资助项目(BRA2019303)

1 AMC 棋盘结构实现 RCS 缩减原理

当平面波垂直入射到棋盘表面时，AMC 结构的总反射能量是所有 AMC 块反射的总和^[10]。假设所有 AMC 反射的幅度均相等，为 A ，根据阵列理论^[8]的概念，全反射为：

$$E_r = 2Ae^{j\varphi_1} + 2Ae^{j\varphi_2} = 2Ae^{j\varphi_1} [1 + e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)}] \tag{1}$$

式中： φ_1 和 φ_2 分别为 AMC₁ 和 AMC₂ 的反射相位。从式(1)可看出，当 $\varphi_2 - \varphi_1 = \pm 180^\circ$ 时，2 个 AMC 块反射的能量可以相互抵消。通常，反射相位差会随频率发生变化，将 PEC 板作为参考，以孔径方向上的反射能量减少 10 dB 作为 RCS 的缩减标准，有效相位差的范围由下列不等式给出：

$$\frac{|E_r|^2}{|E_{pec}|^2} \leq -10 \text{ dB} \tag{2}$$

式中 E_{pec} 是 PEC 表面的总反射场。因此所提出的有效相位差是：

$$143^\circ \leq |\varphi_2 - \varphi_1| \leq 217^\circ \tag{3}$$

当满足上述条件时，棋盘结构的 2 个部分反射幅度相等，相位相差 $180^\circ \pm 37^\circ$ ，所以反射方向上的能量被散射到其他方向，即在反射方向上反射波由聚波束变换为多个幅度下降的波束，该幅度的下降值即为在该方向上的 RCS 缩减量。

2 AMC 棋盘结构设计及分析

2.1 AMC 单元设计

根据上述原理的分析，实现 RCS 缩减的关键是设计出有效相位差在 $180^\circ \pm 37^\circ$ 的 AMC 单元。图 1 为设计的 AMC 贴片单元，该单元贴附于介电常数为 4.4、损耗系数为 0.02 的 FR4 介质板上，介质板下表面接金属接地板。经过优化仿真，单元的周期 $p=8 \text{ mm}$ ，单元最终尺寸为 $C_1=6.5 \text{ mm}, C_2=5.24 \text{ mm}, C_3=4.5 \text{ mm}, C_4=3.3 \text{ mm}, C_5=2 \text{ mm}, W_1=1 \text{ mm}, W_2=0.5 \text{ mm}$ ，介质板厚度 $H=2 \text{ mm}$ 。

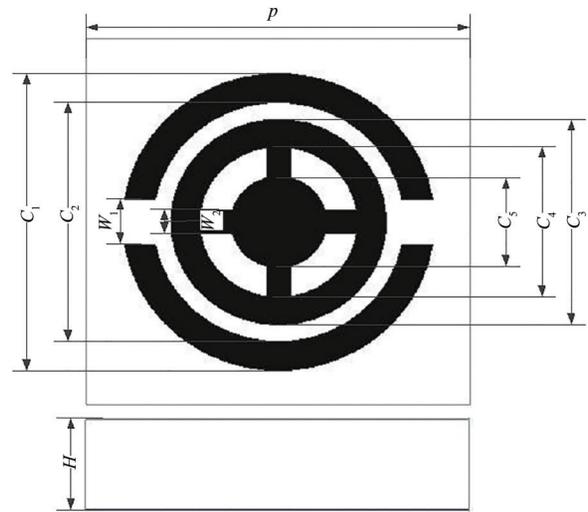


Fig.1 Structure of AMC cell
图 1 AMC 单元结构图

利用电磁仿真软件 HFSS 的 Floquet 端口和主从边界条件对 AMC 单元进行全波分析并进行优化仿真。优化后的单元在 X 极化和 Y 极化波垂直入射下的反射相位曲线见图 2。可以看出，在 11.6 GHz 处 X 极化波入射下反射相位为 0° ，并且与 Y 极化波入射的反射相位曲线相交。将 2 种极化形式下反射相位作差取模，获得图 3 的反射相位差曲线。从图 3 中可以看出，相位差在 $143^\circ \sim 217^\circ$ 的频带范围为 8.6~14.6 GHz，其相对带宽为 51.7%，仿真结果显示该单元结构满足 RCS 缩减的基本要求。

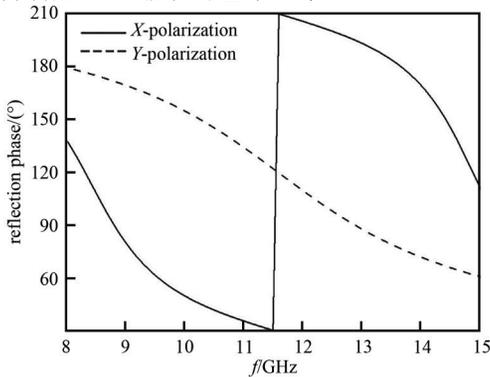


Fig.2 Reflection phase at X-polarization and Y-polarization
图 2 X 极化和 Y 极化下的反射相位

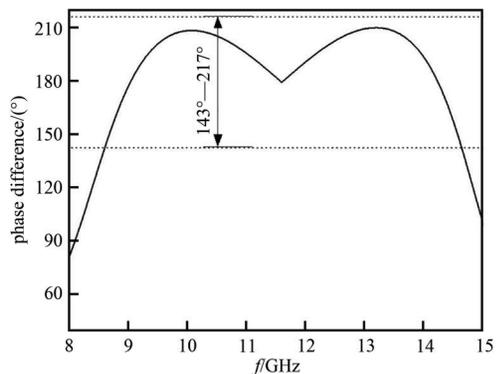


Fig.3 Reflection phase difference
图 3 反射相位差

2.2 AMC 棋盘结构分析

为了验证 AMC 具有缩减 RCS 的功能，且尽可能地扩大缩减带宽，采用上述 AMC 单元构建正交反射的棋盘结构。见图 4(a)和图 4(b)，AMC1 和 AMC2 块为 3×3 的单元按周期 $p=8 \text{ mm}$ 排列组成，由 AMC1 和 AMC2 块相互正交排列组成图 4(c)的棋盘结构，该棋盘结构由 81 个小 AMC 单元周期排列在介电常数为 4.4、损耗系数为 0.02 的 FR4 介质基板上，介质板下表面接金属接地板，棋盘结构的整体尺寸为 $72 \text{ mm} \times 72 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。同时，建立同样尺寸的 PEC 反射面(见图 4(d))与设计的超表面棋盘结构形成对照，分析 RCS 缩减情况。

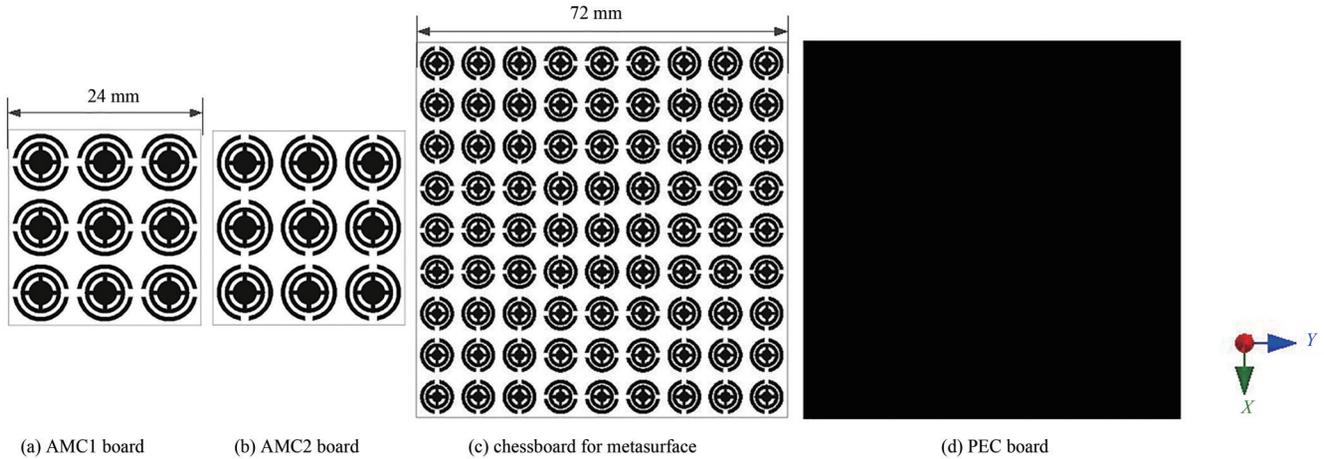


Fig.4 Chessboard for AMC

图4 AMC 棋盘结构

采用 HFSS 仿真软件的平面波激励，分别用 X 极化和 Y 极化波垂直入射到棋盘表面。棋盘结构和 PEC 板的单站 RCS 以及缩减量随频率的变化见图 5 和图 6。从仿真结果可以看出，AMC 棋盘结构相较于 PEC 平面在 7.5~15 GHz 范围内具有更小的 RCS。其中，X 极化波垂直入射时在 8.9 GHz 处 RCS 缩减量达到最大为 27 dB，Y 极化波垂直入射时在 8.7 GHz 处的 RCS 缩减量达到最大为 28 dB。该仿真结果与上述 AMC 单元在 $143^\circ \sim 217^\circ$ 相位差所对应的 10 dB 缩减带宽存在一定的误差，原因是 AMC 单元反射相位的仿真是基于无限周期排列，而 AMC 棋盘结构并不能实现该理想情况，但是该结构的缩减频带范围也基本覆盖 X 波段，能够用来实现对工作频率在 X 波段的微带天线的 RCS 缩减。

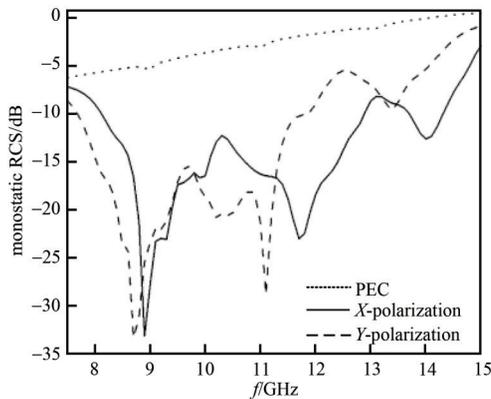


Fig.5 Monostatic RCS of chessboard and PEC board
图5 棋盘结构和PEC板的单站 RCS

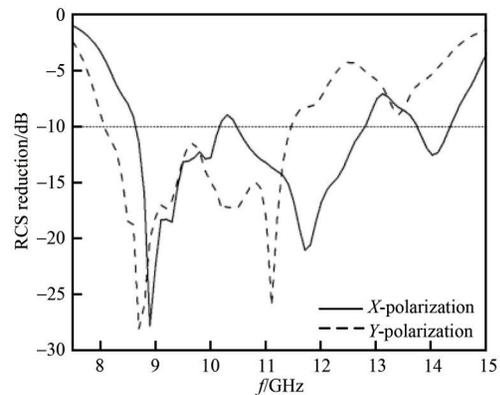


Fig.6 RCS reduction at X and Y-polarization
图6 X极化和Y极化下的RCS缩减量

3 加载 AMC 结构的微带天线设计

微带天线具有剖面低、尺寸小、重量轻、组阵简单、易于共形等优点而得到广泛应用，因此降低微带天线的带内带外 RCS 具有重要意义。前面通过对设计的 AMC 棋盘结构仿真，实现了在一定频带范围内不同程度的 RCS 缩减。后面通过对微带天线加载 AMC 超材料结构，研究 AMC 对天线的辐射和散射性能。首先，设计了一款工作中心频率在 10 GHz 的普通微带天线作为原始天线，然后在天线四周加载正交排列的 AMC 块形成新的超材料天线并与未加载超材料的原始天线进行对比。加载 AMC 超材料的天线结构和尺寸见图 7，天线辐射贴片尺寸为 $9.1 \text{ mm} \times 6.1 \text{ mm}$ 。为了保证天线只有加载 AMC 结构的差别，并且与上文棋盘结构保持同样的散射特性，天

线辐射贴片和 AMC 结构都贴附于介电常数为 4.4、损耗系数为 0.02、厚度 2 mm 的 FR4 介质板上，介质板下表面接金属接地板，天线采用 50 Ω 同轴探针馈电的形式。

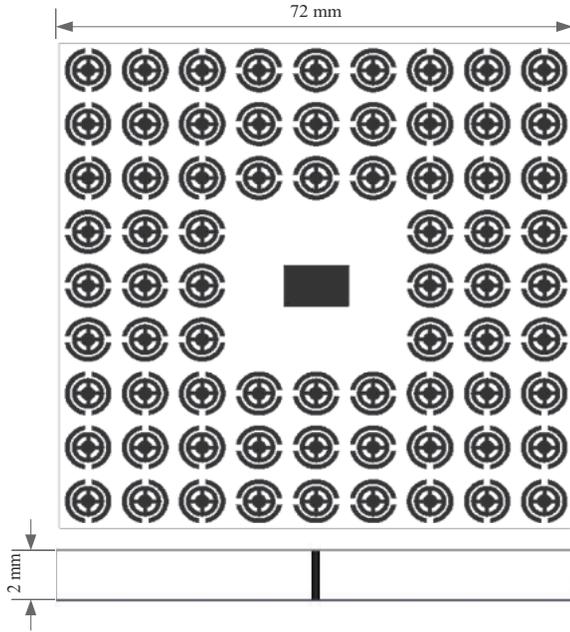


Fig.7 Microstrip antenna loaded with AMC
图 7 加载 AMC 的微带天线

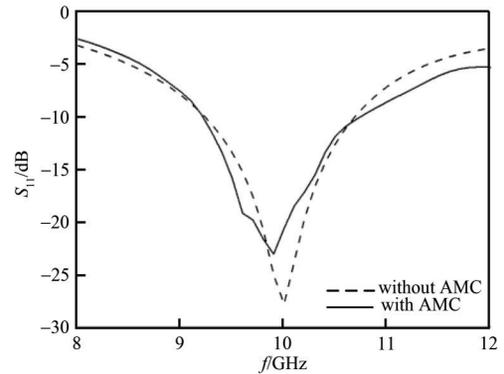


Fig.8 Comparison of simulated reflection coefficient
图 8 模拟反射系数比较

图 8 和图 9 给出了加载 AMC 前后天线的 S 参数和中心频率 10 GHz 处的辐射方向图。仿真结果显示加载 AMC 前后天线的 -10 dB 的频段为 9.2~10.7 GHz，加载超材料后天线的中心频率向低频处偏移了 0.1 GHz，为 9.9 GHz，幅度由 -27 dB 升至 -23 dB。从天线的辐射方向图可看出天线在正向增益差异不大，加载 AMC 的天线后向增益降低，但天线整体上保持了良好的辐射性能。 X 极化、 Y 极化入射波垂直入射时天线的单站 RCS 随频率变化曲线见图 10 和图 11。可看出加载超材料的天线在 2 种极化波垂直入射的情况下都有显著的 RCS 缩减，在 8.4~14.8 GHz (相对带宽为 55.1%) 的频带范围内，天线的 RCS 缩减超过 7.5 dB，其中最大缩减量达 33.8 dB。图 12 给出天线在 10 GHz 处 RCS 分别在 xoz 面和 $yo z$ 面随俯仰角的关系。图 12 中结果显示，在 2 种极化波垂直入射的情况下，实现在 $\pm 18^\circ$ 角域内的 RCS 缩减。天线在 10 GHz 处的三维散射方向见图 13，可以清晰地看到原来集中在法向的能量被均匀地散射到别的方向上，该仿真表明加载超材料有效缩减了天线的后向 RCS。

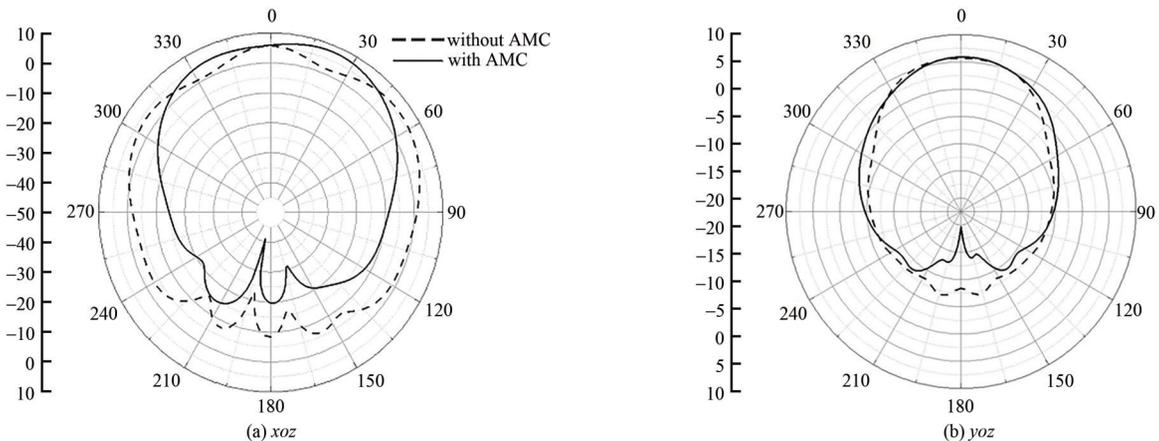


Fig.9 Comparison of radiation patterns at 10 GHz
图 9 10 GHz 处的辐射方向图比较

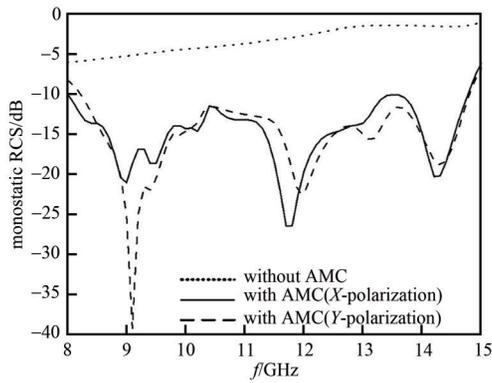


Fig.10 Monostatic RCS of antenna
图 10 加载 AMC 前后天线的单站 RCS

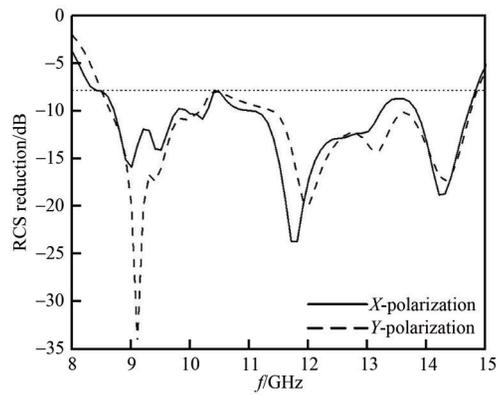


Fig.11 RCS reduction at X and Y-polarization
图 11 X 极化和 Y 极化下的 RCS 缩减量

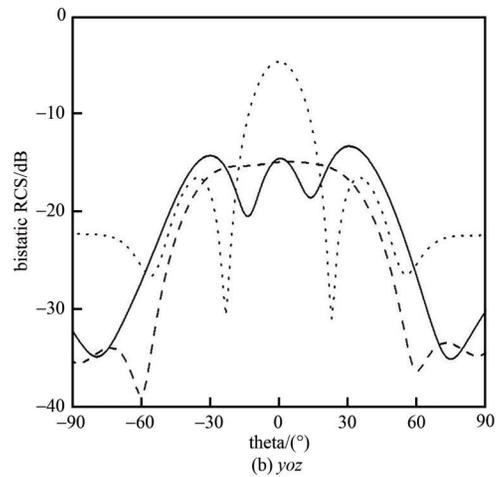
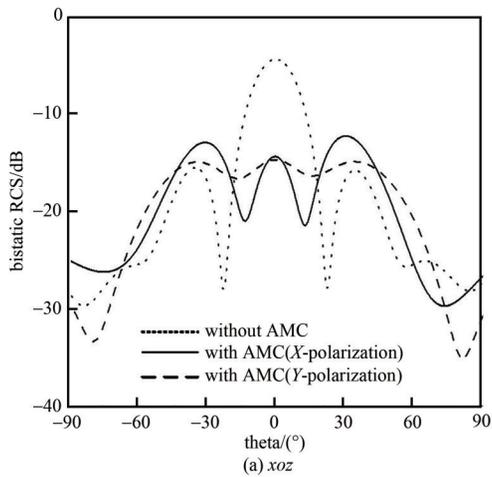


Fig.12 Bistatic RCS of antenna at 10 GHz
图 12 加载 AMC 前后天线在 10 GHz 处的双站 RCS

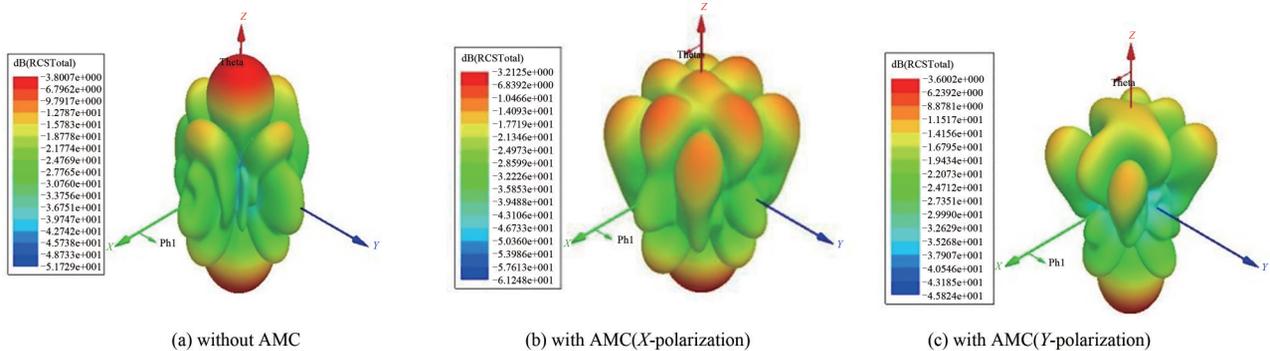


Fig.13 Scattered field from antenna with and without AMC at 10 GHz
图 13 加载 AMC 前后天线在 10 GHz 处的散射场

4 结论

本文提出了一种基于正交排列的 AMC 棋盘结构，设计了一款加载 AMC 超材料的微带天线，经实验仿真分析，该天线在保持良好辐射性能的同时，对 X、Y 两种极化波垂直入射时在 8.4~14.8 GHz 频带内具有超过 7.5 dB 的 RCS 缩减。因此，本文的研究内容对实现 X 波段的低 RCS 微带天线具有一定的参考意义。此外，该结构设计原理简单，设计操作简便，可应用于天线等辐射体的隐身。实验接下来的工作是研究电磁波斜入射情况下，该 AMC 棋盘结构的 RCS 缩减情况，并对加载超材料的微带天线进行实物加工、测试以验证仿真结果的正确性。

参考文献:

- [1] XUE J,JIANG W,GONG S X. Chessboard AMC surface based on quasi-fractal structure for wideband RCS reduction[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018,17(2):201-204.
- [2] ZHAO Y,CAO X,GAO J,et al. A low-RCS and high-gain slot antenna using broadband metasurface[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016,15(1):290-293.
- [3] DIKMEN C M,CIMEN S,CAKIR G,et al. Planar octagonal-shaped UWB antenna with reduced radar cross section[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014,62(6):2946-2953.
- [4] THAKARE Y B,RAJKUMAR. Design of fractal patch antenna for size and radar cross-section reduction[J]. Microwaves Antennas and Propagation, 2010,4(2):175-181.
- [5] TURPLIN J P,SIEBER P E,WERNER D H,et al. Absorbing ground planes for reducing planar antenna radar cross-section based on frequency selective surfaces[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013:12(1):1456-1459.
- [6] LANDY N I,SAJUYIGBE S,MOCK J J,et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008,100(20):207402-1-207402-6.
- [7] JIANG W,LIU Y,GONG S,et al. Application of bionics in antenna radar cross section reduction[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009,8(8):1275-1278.
- [8] PAQUAY M,IRIARTE J C,EDERRA I,et al. Thin AMC structure for radar cross-section reduction[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007,55(12):3630-3638.
- [9] FU Y,LI Y,YUAN N,et al. Wideband composite AMC surfaces for RCS reduction[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2011,53(4):712-715.
- [10] ZHAO Y, YU C, GAO J, et al. Broadband metamaterial surface for antenna RCS reduction and gain enhancement[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015. DOI:10.1109/TAP.2015.2415855.

作者简介:

任高飞(1995-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为超材料天线应用.email:1085955850@qq.com.

徐勤(1962-), 男, 学士, 研究员, 主要研究方向为电磁场与微波技术、天馈系统设计.