

Research on RCS Reduction Method of Microstrip Antenna Based on Artificial Magnetic Conductor (AMC)

Zongshan Wang, Peng Li, Zhuguan Liang*, Chaokai Zhou, Hongwei Ding

Information Institute of Yunnan University, Kunming Yunnan
Email: *375888295@qq.com

Received: Nov. 17th, 2018; accepted: Nov. 28th, 2018; published: Dec. 12th, 2018

Abstract

For the problem of antenna radar cross-section reduction, this paper uses $N = 7$ ring and square ring AMC block to carry out 3×3 checkerboard combination, and designs an RCS reflection screen with RCS reduction of more than -10 dB in a wide frequency range. The microstrip antenna processed by the common RCS reduction profile technology is used as a reference antenna, and the RCS reflection screen is loaded to make the RCS reduction and the RCS reduction to reach -10 dB in the multi-scattering direction and the wider frequency band. In order to optimize the RCS reduction effect, based on this, a new method based on artificial magnetic conductor (AMC) for microstrip antenna RCS reduction is proposed. The paper designs the checkerboard AMC on the microstrip antenna, so that under the vertical illumination of the plane wave, the RCS of the microstrip antenna shrinks in a relatively wide frequency band; the RCS reduction is greatly improved, generally at -10 dB \sim -30 dB; the operating bandwidth of the microstrip antenna is widened to 2.39~2.58 GHz, and the bandwidth is 190 MHz; the relative reference antenna operating band processed by the ordinary form factor technology is 2.42~2.5 GHz, and the bandwidth is 80 MHz. The bandwidth of the microstrip antenna after the AMC structure is increased by 237.5%. The microstrip antenna can achieve RCS reduction in the 2~14 GHz band (in-band and out-of-band) with a slight increase in antenna gain.

Keywords

Artificial Magnetic Conductor (AMC), RCS Reduction, Checkerboard, RCS Reflector

基于人工磁导体(AMC)的微带天线RCS减缩方法研究

王宗山, 黎 鹏, 梁竹关*, 周朝凯, 丁洪伟

*通讯作者。

云南大学信息学院, 云南 昆明
Email: 375888295@qq.com

收稿日期: 2018年11月17日; 录用日期: 2018年11月28日; 发布日期: 2018年12月12日

摘要

针对天线雷达截面减缩问题, 本文利用 $N = 7$ 的圆环和方环AMC块进行 3×3 的棋盘式组合, 设计出了在宽频带范围内RCS减缩达 -10 dB以上的RCS反射屏。又以普通RCS减缩外形技术处理后的微带天线作为参考天线, 加载设计出RCS反射屏, 使RCS减缩量在多散射方向和更宽频带内实现RCS减缩到达 -10 dB的效果。为优化RCS减缩效果, 该文进一步提出一种基于人工磁导体(AMC)的微带天线RCS减缩方法。论文将设计出的棋盘式AMC加载在微带天线上, 使得在平面波垂直照射下, 微带天线RCS减缩在相对很宽频带内, 且RCS减缩量获得了很大的提升, 普遍在 -10 dB \sim -30 dB, 而且微带天线工作带宽拓宽为 $2.39\sim 2.58$ GHz, 带宽为 190 MHz, 只经过普通外形技术处理的相对参考天线工作频带 $2.42\sim 2.5$ GHz, 带宽为 80 MHz, 两者相比, 加载AMC结构后微带天线带宽增加了 237.5% 。微带天线在 $2\sim 14$ GHz频段范围内(带内和带外)均可实现RCS减缩效果, 且天线增益略有增加。

关键词

人工磁导体(AMC), RCS减缩, 棋盘式, RCS反射屏

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着信息化技术的快速发展, 现代战争愈加依靠通信、飞行器隐身、探测等技术。特别是隐身技术在战争中起着至关重要的作用。隐身性能越好, 就意味着在战争中被敌方发现的几率越小, 生存能力也就越强。雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)减缩技术是指在战争中隐藏自己, 尽量避免被敌方探测雷达探测到, 从而增强自身生存能力, 提升自己战斗力的关键技术[1] [2]。RCS减缩一般有四种方法: 外形技术、吸波材料技术、无缘对消技术、有缘对消技术[3] [4]。

早期学者先后提出了天线散射的普通理论, 短路天线散射理论, 匹配负载天线散射理论等理论, 使得散射理论有了很好的发展[5]。经过很长时间的研究, 时至今日, 微带天线RCS减缩研究愈来愈趋向成熟, 也更多的运用到实际当中。常规的RCS减缩研究主要是通过外形技术来实现, 现在的重点是在研究微带天线的阵列、特殊复杂结构和超材料作为涂覆层上进行深入。对微带天线的RCS减缩的研究大致可以归纳为五种: 电阻加载技术、开槽技术、基片材料和覆盖层改进、变容二极管加载技术、小型化技术[6] [7]。但这几类方法在降低天线RCS时都存在一定的弊端, 且只凭借单一的方法很难在不影响天线辐射的条件下达到RCS减缩的目的。

本文以外形技术RCS减缩微带贴片天线为基础, 加载 3×3 AMC棋盘式结构, 实现微带天线带内带外RCS减缩, 提升RCS减缩数量级, 且拓宽微带天线工作带宽[8] [9] [10] [11]。

2. 利用棋盘式 AMC 设计宽带低 RCS 反射屏

本章对 AMC 单元进行排布组成反射屏, 根据不同 AMC 结构的相位差, 产生相位干涉, 抑制特定方向上电磁波的传播, 以达到减小单站 RCS 的目的。

AMC 同相反射带宽有限, AMC 与 PEC 棋盘式布局复合成的低 RCS 反射屏的工作带宽同样受到 AMC 同相反射带宽的限制, 为了拓宽工作带宽, 前人学者通常使用两种或两种以上的 AMC 结构来代替 AMC 和 PEC, 满足相位差 $143^\circ \leq |\varphi_1 - \varphi_2| \leq 217^\circ$, 即可实现相位差相对应工作频带内的 RCS 减缩。采用圆环 AMC 和方环 AMC 进行棋盘式组合, 组成 3×3 棋盘式结构如图 1 所示。

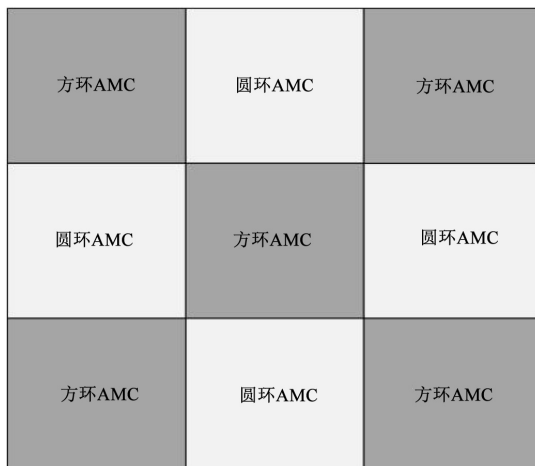


Figure 1. 3×3 checkerboard combination structure
图 1. 3×3 棋盘式组合结构图

实践证明, 对 AMC 结构反射相位产生影响的参数很多。通常只有 AMC 单元数目达到一定的数量, 才能更好的表现出其反射相位特性。但是, 在实际设计过程中, AMC 单元数目过多则会产生一些负面影响, 一是设计加工难度增大, 二是会导致散射的栅瓣往边射方向靠拢, 不利于整体目标 RCS 的降低。本节分别采取 $N \times N = 3 \times 3$ 、 5×5 、 7×7 、 9×9 的规模个数组成 AMC 块。

AMC 单元尺寸选择为: 金属方环贴片内边长 $L_0 = 4.0 \text{ mm}$, 金属方环贴片外边长 $L_1 = 6.6 \text{ mm}$, 金属圆环贴片内半径 $R_0 = 1.5 \text{ mm}$, 金属圆环贴片外半径 $R_1 = 2.5 \text{ mm}$ 。分别取 $N = 3$ 、 5 、 7 、 9 时, $f = 8 \text{ GHz}$ 时, 其单站 RCS 减缩对比如图 2 所示。

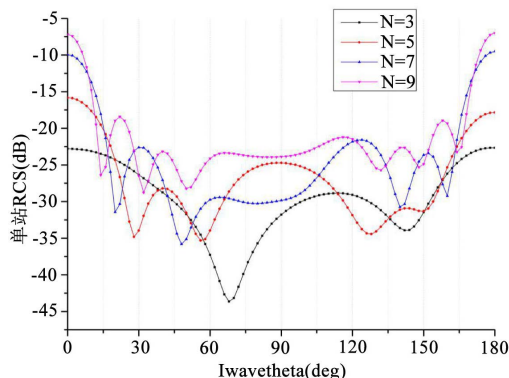


Figure 2. AMC block single station RCS of different sizes
图 2. 不同规模数 AMC 块单站 RCS

图 2 分析可知, 随着 AMC 单元个数的增加, 反射能量更为分散, 可达到有效抑制主瓣的目的从而降低 RCS。入射波从不同方向入射, 在单元法线方向上, 单站 RCS 减缩效果相对较差, 但总体都达到-10 dB 以上, 满足设计要求。

选取 $f = 8 \text{ GHz}$, $\varphi = 0^\circ$ 面 RCS 方向图对比如图 3 所示。

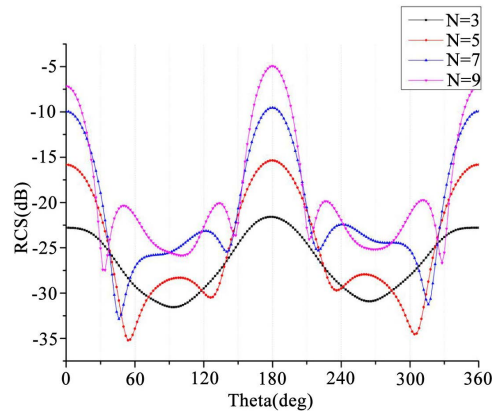


Figure 3. $F = 8 \text{ GHz}$, $\varphi = 0^\circ$ -side RCS direction comparison chart

图 3. $F = 8 \text{ GHz}$, $\varphi = 0^\circ$ 面 RCS 方向对比图

由图 3 分析可以看出, 单元的数目对 AMC 块 RCS 效果明显, 反射能量主瓣出现在法线方向, 并且随着 AMC 单元个数增多, 法向方向上能量越集中, 栅瓣波束宽度变窄, 当 $N = 9$ 时, RCS 已不能达到-10 dB, 所以 N 个数取值过多并不利于 RCS 的降低。

选取 $N = 7$ 的棋盘 AMC 结构研究入射波频率对 RCS 的影响, 仿真结果如图 4 所示。

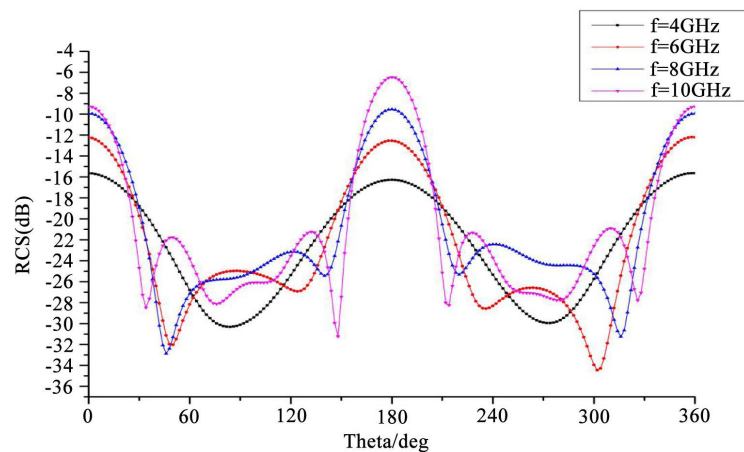


Figure 4. Different frequencies, $\varphi = 0^\circ$, RCS pattern

图 4. 不同频率, $\varphi = 0^\circ$, RCS 方向图

图 4 对比不同频率下 RCS 方向图, 可以看出, 伴随频率的增加, 栅瓣向法线方向靠拢, 能量向法线方向集中, 但表面其余方向 RCS 有明显减缩, 在一定频率范围内, RCS 减缩可达到-10 dB 以上。

综合分析, AMC 单元在设计时, 尺寸和数目尤为重要, 在高频时单元尺寸要远小于工作波长, 这样可能会导致整体电尺寸随频率升高而增大, 影响 RCS 减低效果。高频率同时会引起周期边界下的高次模, 对 RCS 减低效果产生负面影响。在 AMC 结构应用于 RCS 的设计中, 单元小型化设计很重要, 但小型化

过程中伴随出现窄频带带宽减小的影响，因此，在设计反射屏时只能综合考量、择衷选择。考虑本文设计微带天线工作波长为百毫米级别，为实现其更宽频段内的单站 RCS 减缩达-10 dB，我们择衷选择 7×7 单元个数组成 3×3 规模的 AMC 棋盘式组合，棋盘式 AMC 结构和 RCS 仿真结果分别如图 5 和图 6 所示。

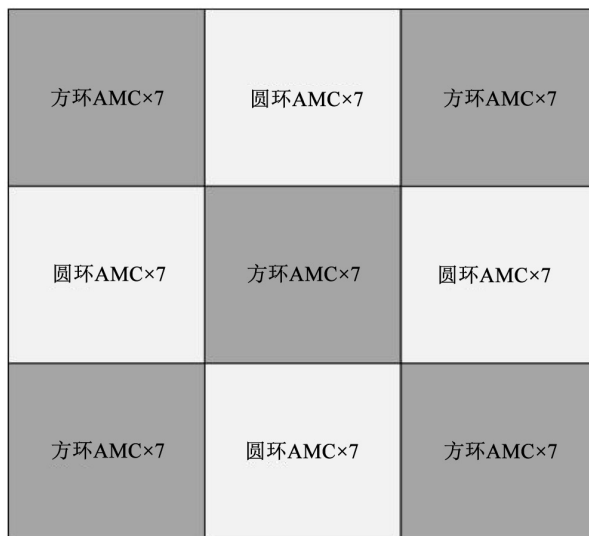


Figure 5. AMC 3×3 checkerboard layout
图 5. AMC 3×3 棋盘式布局图

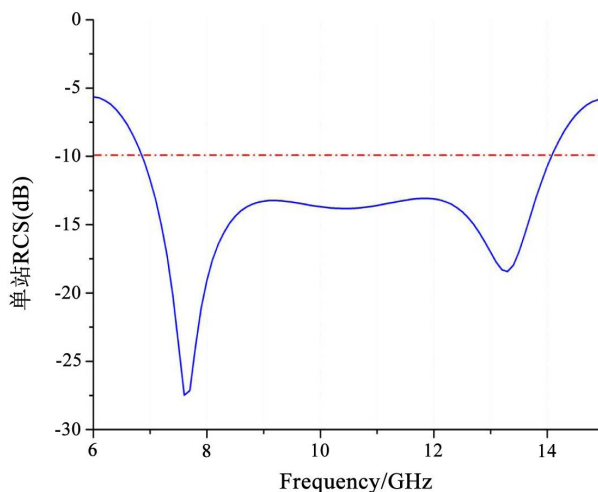


Figure 6. RCS reduction curve (IWaveTheta = 0°)
图 6. RCS 缩减曲线(IWaveTheta = 0°)

由图 6 分析可知，当入射波垂直照射时，在 6.9~14.1 GHz 频带范围内，单站 RCS 减缩效果达到-10 dB 以上。在 5.6 GHz 处，RCS 减缩量达到最大值，此频点与两种 AMC 单元反射相位差位 180 度频点基本一致。13.3 GHz 出现第二个减缩峰值，是反射相位差存在 0 点，此时棋盘结构类似于 AMC 与 PEC 组合。此设计的频带宽度达到 7.2 GHz，有效拓展了工作带宽。

当入射波入射角度分别取 0° 、 30° 、 60° 时，RCS 减缩量对比如图 7 所示。

对比入射波从 0° 、 30° 、 60° 等不同入射角度照射的情况下，RCS 减缩量在较宽频段内均能达到-10 dB 以上，达到设计预期目标。

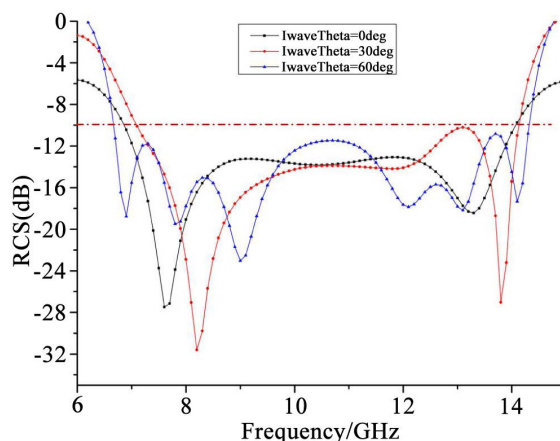


Figure 7. RCS reduction curve for different incident wave angles
图 7. 不同入射波角度 RCS 减缩曲线

3. 新型 AMC 结构在微带天线 RCS 减缩中的应用

本节主要在对棋盘式 AMC 结构研究的基础上, 将微带天线与 AMC 结构相结合设计, 通过仿真分析对比参考微带天线与加载 AMC 反射屏后的微带天线的工作性能, 以及 RCS 减缩效果。

参考天线选取了进行加载探针、贴片小型化、开槽技术等外形 RCS 减缩技术处理后的天线, 尺寸结构如图 8 所示。

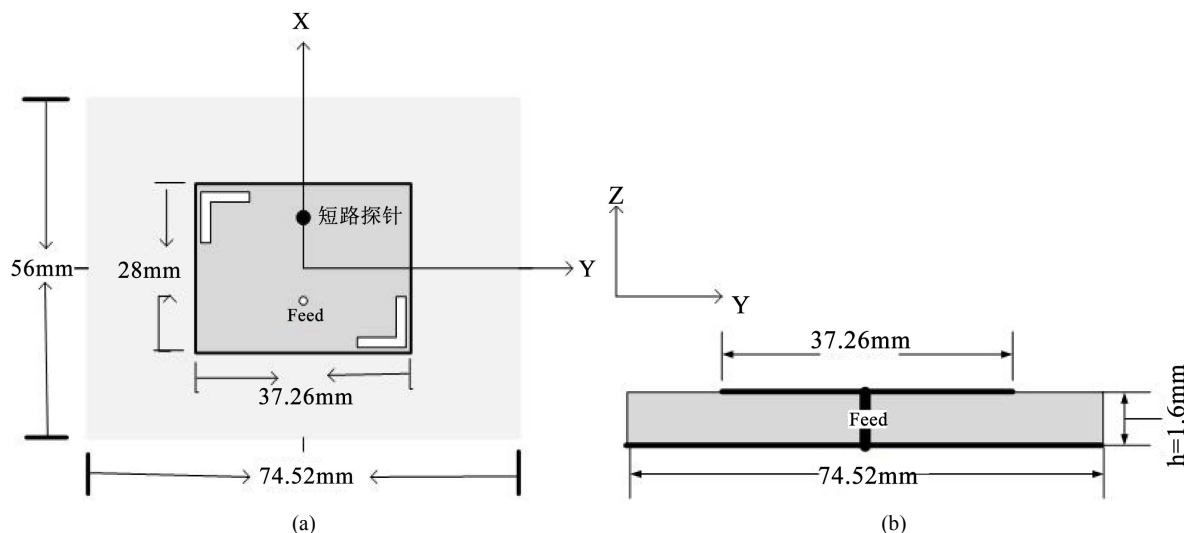


Figure 8. Reference antenna structure: (a) Reference antenna top view; (b) Reference antenna top view
图 8. 参考天线结构图: (a) 参考天线俯视图; (b) 参考天线俯视图

参考天线介质采用相对介电常数为 4.4 的 FR4-opoxy 材料, 介质层厚度为 1.5 mm。天线采用同轴探针馈电的方式。加载 AMC 后天线分为两部分: 介质 1 为与参考天线同材质 FR4-opoxy 材料, 厚度与参考天线一致为 1.6 mm; 介质 2 采用与 AMC 反射屏相同的相对介电常数为 2.2 的 Duroid 材料, 厚度与 AMC 结构一致为 3 mm。

入射波垂直照射的情况下, 加载 AMC 反射屏后微带天线与参考天线仿真结果 S11 参数对比如图 9 所示。

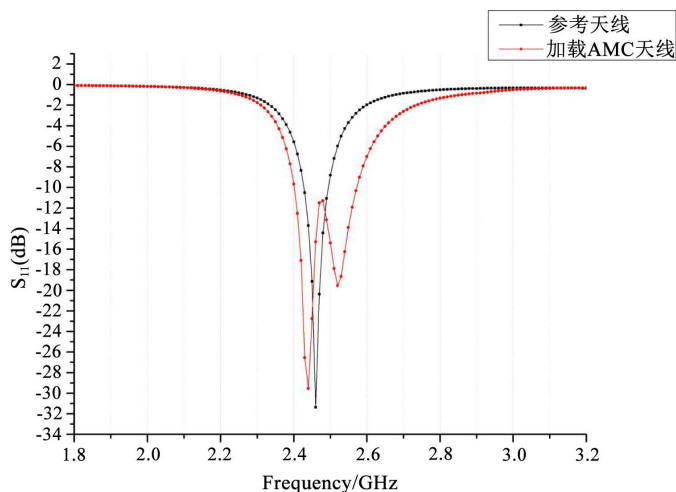


Figure 9. Simulation comparison of loaded AMC structure antenna and reference antenna S_{11} parameters
图 9. 加载 AMC 结构天线与参考天线 S_{11} 参数仿真对比图

图 9 给出了加载 AMC 结构天线和普通微带天线的 S_{11} 参数仿真对比结果。加载 AMC 结构后，天线工作频带为 2.39~2.58 GHz，带宽为 190 MHz。参考天线工作频带为 2.42~2.5 GHz，带宽为 80 MHz。两者相比，加载 AMC 结构后微带天线带宽增加了 237.5%。

加载 AMC 反射屏后微带天线与参考天线仿真结果辐射方向图对比如图 10 所示。

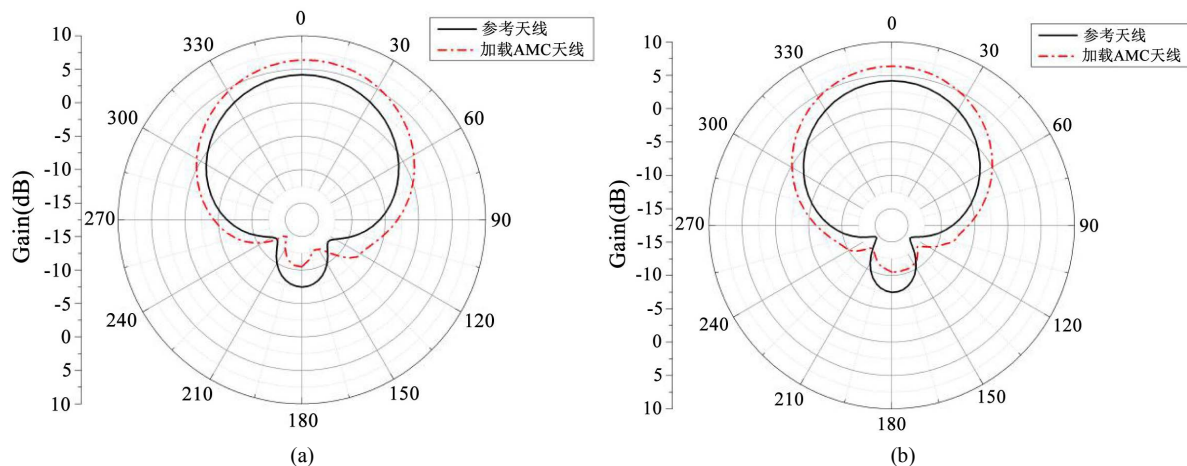


Figure 10. Comparison of the radiation pattern of the loaded AMC structure antenna and the common antenna: (a) XOZ plane pattern; (b) YOZ plane pattern

图 10. 加载 AMC 结构天线与普通天线辐射方向图对比图：(a) XOZ 面方向图；(b) YOZ 面方向图

分析图 10 可知，加载棋盘式 AMC 后天线的辐射方向图发生了一定变化，但对天线辐射性能影响不大，且增益在棋盘面法线方向增大了约 2.2 dB。

加载 AMC 反射屏后微带天线与参考天线仿真结果 RCS 减缩对比如图 11 所示。

分析图 11 可知，加载 AMC 后天线 RCS 减缩效果相对参考天线有了明显提升，在平面波垂直入射的情况下，RCS 仿真对比效果，在 2~16 GHz 整个频段范围内，RCS 减缩最可达 -23.7 dB。参考天线工作带宽在 2.39~2.58 GHz，加载 AMC 后不仅实现了微带天线带内 RCS 减缩，还实现带外 RCS 减缩。

参考天线与加载天线 RCS 三维分布对比如图 12 所示。

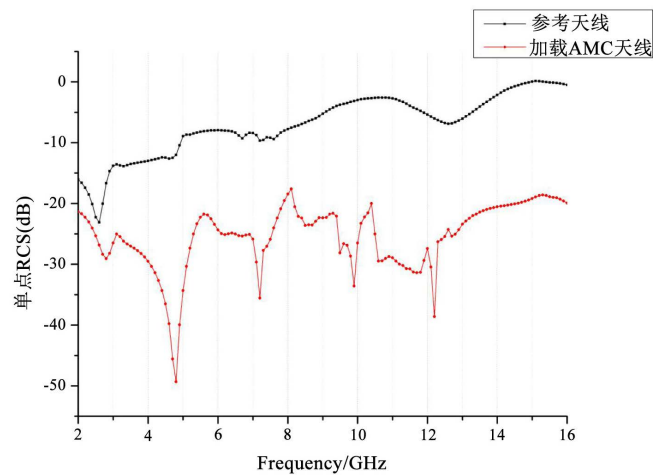


Figure 11. Comparison of single-station RCS with frequency change between loaded AMC antenna and reference antenna
图 11. 加载 AMC 天线与参考天线单站 RCS 随频率变化对比图

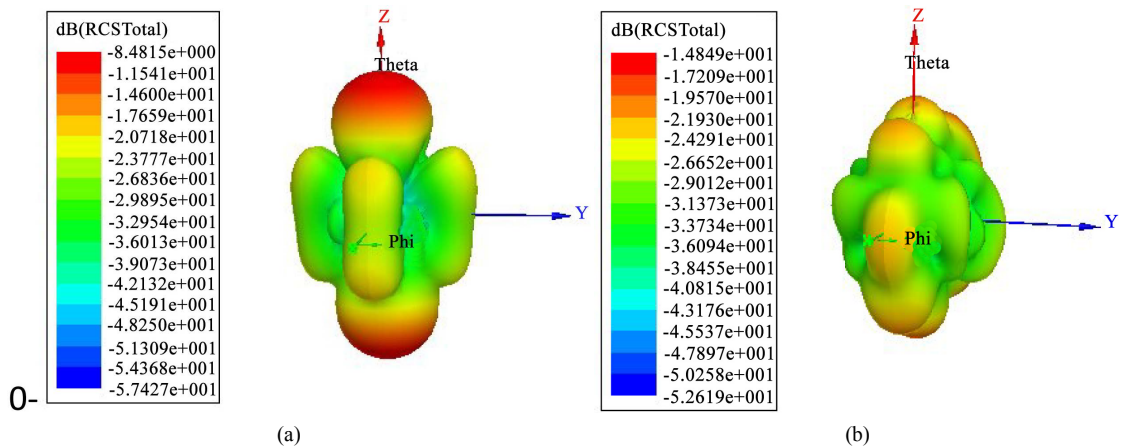


Figure 12. Reference antenna and loaded AMC antenna RCS three-dimensional map: (a) Reference antenna; (b) Load AMC antenna
图 12. 参考天线与加载 AMC 天线 RCS 三维分布图: (a) 参考天线; (b) 加载 AMC 天线

图 12 对比看出, 平面波垂直入射时, 参考天线法线方向上散射明显, 加载 AMC 结构后, 法向上的强散射得到有效抑制, 使散射能量向四周发散, 实现法向上 RCS 有效减缩, 利于天线隐身。

4. 结论

本文主要采用圆环 AMC 和方环 AMC 进行棋盘式组合, 为实现宽频段内的单站 RCS 减缩达 -10 dB, 择衷选择 7×7 单元个数组成 3×3 规模的 AMC 棋盘式组合, 利用 $N = 7$ 的圆环和方环 AMC 块进行 3×3 的棋盘式组合, 设计出了在宽频段范围内 RCS 减缩达 -10 dB 以上的 RCS 反射屏。并以经过加载探针、贴片小型化、开槽技术等外形 RCS 减缩技术处理后的微带天线作为参考天线, 加载设计的 RCS 反射屏, 使 RCS 减缩量在多散射方向和更宽频带内实现 RCS 减缩到达 -10 dB 的效果。

普通外形技术处理后, 微带天线 RCS 减缩量均在 -10 dB 以内, 且频带很窄, 在个别频段范围内 RCS 才有减缩效果, 微带天线工作频率 2.46 GHz 时, RCS 减缩无法实现, 为带外 RCS 减缩, 存在很大的局限性。同在平面波垂直照射下, 加载棋盘式 AMC 结构后, 不仅微带天线 RCS 减缩在相对很宽频带内, 且 RCS 减缩量获得了很大的提升, 普遍在 -10 dB \sim -30 dB, 而且微带天线工作带宽拓宽为 $2.39 \sim 2.58$ GHz,

带宽为 190 MHz, 相对参考天线工作频带 2.42~2.5 GHz, 带宽为 80 MHz, 两者相比, 加载 AMC 结构后微带天线带宽增加了 237.5%。微带天线在 2~14 GHz 频段范围内(带内和带外)均可实现 RCS 减缩效果, 且天线增益略有增加。

参考文献

- [1] 周禹龙, 曹祥玉, 高君, 等. 双频频率选择表面及其在微带天线带宽 RCS 减缩中的应用[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(6): 1446-1451.
- [2] 张晨, 曹祥玉, 高军, 等. 低 RCS 宽带磁电偶极子贴片天线设计[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(4): 1012-1016.
- [3] 徐唯伟. 带内低散射微带天线及其阵列研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [4] 徐胜, 徐元铭. 有源对消隐身系统设计研究[J]. 航空电子技术, 2014(3): 26-32.
- [5] Wu, T., Li, Y., Gong, S.X. and Liu, Y. (2008) A Novel Low RCS Microstrip Patch Using Aperture Coupled Microstrip Dipoles. *Journal of Electromagnetic Waves and Application*, **22**, 953-963. <https://doi.org/10.1163/156939308784150128>
- [6] 陶长亚. 微带天线 RCS 减缩研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [7] 郭晖. 天线散射与天线 RCS 研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2003.
- [8] 赵一, 曹祥玉, 高军, 等. 人工磁导体正交布阵的宽带低雷达截面反射屏[J]. 物理学报, 2013, 62(15): 154204-9.
- [9] 张泳. 人工磁导体在电磁辐射及散射问题中的应用研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [10] 张泳, 王秉中. 基于 AMC 的低 RCS 屏的设计与研究[C]//2009 年全国微波毫米波会议论文集. 西安: 中国电子学会, 2009.
- [11] Wang, W.T., Gong, S.X., Wang, X., et al. (2009) RCS Reduction of Array Antenna by Using Bandstop FSS Reflector. *Journal of Electromagnetic Waves & Applications*, **23**, 1505-1514. <https://doi.org/10.1163/156939309789476473>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3983, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: hjwc@hanspub.org