

基于超表面的低雷达散射截面宽频贴片阵列天线设计

王思铭 高军 曹祥玉* 郑月军 兰俊祥

(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

摘要: 该文设计了一种基于超表面(MS)的低雷达散射截面(RCS)宽频贴片阵列天线。该天线由工作在不同频段的两种开缝贴片天线组成 2×4 的八元阵, 以此实现天线小型化并扩展其带宽, 根据相位相消原理, 将两种人工磁导体(AMC)以棋盘布阵的方式组成超表面加载到天线阵周围, 使其具有低RCS特性。实测和仿真结果表明: 加载超表面后, 天线工作带宽由5.7~6.2 GHz扩展为5.6~6.6 GHz, 相对带宽增大1倍, 辐射特性基本保持不变; 当平面波垂直入射时, 天线单站RCS减缩效果明显, 其中, X极化波下3 dB减缩带宽为5.3~7.0 GHz, 最大减缩量达31 dB, Y极化波下3 dB减缩带宽为5.8~6.9 GHz。

关键词: 阵列天线; 超表面; 雷达散射截面; 宽频

中图分类号: TN82

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)09-2273-08

DOI: 10.11999/JEIT171184

Design of Wideband Patch Antenna Array with Low RCS Performance Based on Metasurface

WANG Siming GAO Jun CAO Xiangyu ZHENG Yuejun LAN Junxiang

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: A wideband patch antenna array with low Radar Cross Section (RCS) based on metasurface is proposed. The 2×4 antenna array is composed of two kinds of slotted patch antennas working at different frequency band, realizing the miniaturization and bandwidth broadening of the antenna array. Then, based on the phase cancellation principle, low RCS performance is realized owing to the metasurface consisting of two Artificial Magnetic Conductor (AMC) structures in chessboard configuration. Simulated and measured results show that the working frequency band is expanded from 5.7~6.2 GHz to 5.6~6.6 GHz and radiation performance remains well with metasurface added to. Meanwhile the antenna monostatic RCS is reduced significantly. 3 dB RCS reduction is achieved over the range of 5.3 GHz to 7.0 GHz and the peak reduction is up to 31 dB under X polarization. While the 3 dB RCS reduction range is 5.8~6.9 GHz under Y polarization.

Key words: Antenna array; Metasurface (MS); Radar Cross Section (RCS); Wideband

1 引言

在电子战与信息战飞速发展的今天, 探测技术及手段不断进步, 对隐身性能的要求也越来越高。天线作为整个雷达系统散射截面积(RCS)的主要贡献者, 其隐身技术的优劣不仅关系到通信系统的生命力, 而且直接影响到其载体的生存能力。因此, 如何降低天线的RCS成为近年来的研究热门^[1-4]。目前, 形式各异的飞行器较多采用微带天线, 因其具有低剖面、低轮廓、易共形、轻质量等众多优

点, 容易实现双频段^[5]、双极化^[6,7]等功能, 在现代无线通信系统中得到广泛应用。

近年来, 新型人工电磁超表面(MS)的出现为微带天线的RCS减缩提供了新思路, 如雷达吸波技术^[8,9]、人工磁导体(AMC)的应用^[10,11]、频率选择表面的设计^[12,13]等方式, 都对改善天线性能有一定作用。文献^[14]设计了一种极化敏感的电磁带隙结构(Electromagnetic Band Gap, EBG), 将这种各向异性的人工磁导体棋盘布阵在天线周围, 有效减缩了RCS, 同时提高了天线增益; 文献^[15]将两种不同角度放置的极化旋转表面单元, 以编码的形式组成编码超表面, 加载到四元天线阵周围, 同时实现了带内带外的RCS减缩。

然而, 随着现代通信的快速发展, 单个天线的性能往往难以满足人们的需求, 许多实际场景都需

收稿日期: 2017-12-18; 改回日期: 2018-04-23; 网络出版: 2018-07-12

*通信作者: 曹祥玉 gigi9694@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61471389, 61671464, 61701523)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61471389, 61671464, 61701523)

要阵列天线来实现应用目的。而目前隐身天线的研究主要集中在单元天线RCS的减缩上,对阵列天线的RCS减缩研究较少,尤其是降低天线整体工作频段内的散射,成为当前迫切需要解决的实际问题。

文本设计了两种工作在不同频段的开缝贴片天线,将其交叉排布组成 2×4 天线阵,并将两种AMC单元以棋盘布阵的形式组成超表面加载到微带天线阵阵元之间,有效减缩了带内外RCS。仿真与实测结果表明:在天线的工作频段内,加载超表面后天线带宽扩宽,辐射性能保持良好;同时,RCS有了明显的减缩,最大减缩量为31 dB,散射性能大大提高。

2 MS设计原理与分析

2.1 AMC棋盘布阵原理

AMC具有同向反射特性,但单个AMC与金属地板交叉布阵,其减缩带宽相对较窄。因此,采用两种AMC结构如图1方式布阵,可得到较好的RCS减缩效果。假设两种AMC在电磁波的垂直照射下产生的电场幅度相同,两者的总反射电场为

$$E = E_{AMC1} \cdot AF_{AMC1} + E_{AMC2} \cdot AF_{AMC2} \quad (1)$$

其中 $E_{AMC1} = A \cdot e^{j\varphi_1}$, $E_{AMC2} = A \cdot e^{j\varphi_2}$, A 为电场的幅度, φ_1 和 φ_2 分别是两种AMC单元的反射相位。入射电磁波垂直入射时,有 $AF_{AMC1} = AF_{AMC2} = 2$,可得

$$E = 2A \cdot (e^{j\varphi_1} + e^{j\varphi_2}) \quad (2)$$

若希望在法线方向棋盘布阵的RCS减缩能在10 dB以上,则

$$|E|^2 / |E_0|^2 \leq -10 \text{ dB} \quad (3)$$

其中, $E_0 = 4A \cdot e^{j\varphi_1}$ 表示两种单元同向等幅的理想反射场,代入式(3)可得

$$\cos(\varphi_1 - \varphi_2) \leq -0.8 \quad (4)$$

由此可得两种AMC单元的相位差范围为

$$143^\circ \leq |\varphi_1 - \varphi_2| \leq 217^\circ \quad (5)$$

由上述分析可知,当电磁波垂直照射时,只要两种AMC的相位差范围在 $143^\circ \sim 217^\circ$ 之间,其RCS减缩量就可以达到10 dB以上。一般情况下,定义有效相位差范围为 $150^\circ \sim 210^\circ$ 。

2.2 MS设计与分析

本文采用基于有限元法的HFSS14.0软件进行仿真,采用主从边界和Floquet端口来模拟无限周期单元,通过对参数的优化分析,得到AMC结构如图2所示,图2(a),图2(b)分别为AMC1和AMC2,单元周期为 $L = 6 \text{ mm}$,深色部分为金属铜,电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ s/m}$ 。AMC1是方环结构,

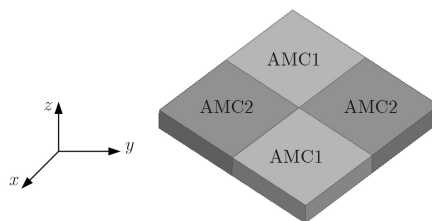


图1 棋盘布阵示意图

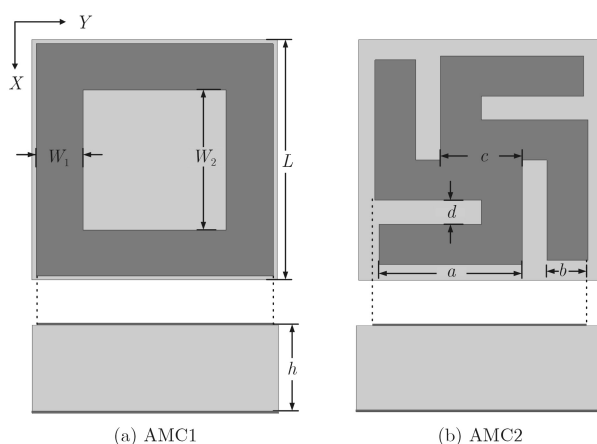


图2 两种AMC单元结构示意图

内环边长 $W_2 = 3.5 \text{ mm}$,环宽度 $W_1 = 1.15 \text{ mm}$;AMC2为风车型结构,由中心方贴片和4条折臂旋转组合而成,中心方贴片边长 $c = 2 \text{ mm}$,折臂的两个矩形贴片长度分别为 $a = 3 \text{ mm}$, $d = 0.6 \text{ mm}$,宽度为 $b = 1 \text{ mm}$ 。介质层为聚四氟乙烯玻璃布板,介电常数 $\epsilon_r = 2.65$,损耗角正切 $\tan \delta = 0.001$,高度 $h = 3 \text{ mm}$ 。

AMC1和AMC2的反射相位特性曲线如图3(a)所示,从图中可以看出,两者的零反射相位分别位于4.8 GHz和7.2 GHz处。图3(b)给出了两种AMC的相位差曲线,阴影部分为 $180^\circ \pm 30^\circ$ 的有效相位差区域。由图可知,在4.8~7.2 GHz范围内,AMC1和AMC2棋盘布阵组成MS可以有效减缩RCS。

3 天线结构设计

天线的小型化就是在保持天线谐振频率的情况下,减小微带天线尺寸,这有利于避免天线与加载的AMC距离过近,引起两者的互耦从而影响阵列天线的带宽,同时可以为MS的排布留出充足的空间,有利于RCS的减缩。为了实现天线的小型化,本文采用曲流技术,就是在贴片天线表面开槽来增大表面电流路径,从而降低天线的谐振频率,减小天线尺寸。设计的开槽贴片天线如图4(a)所示,贴片长 $L_a = 14 \text{ mm}$,宽 $L_b = 12 \text{ mm}$,开槽缝隙位于距中心 W_x 距离处,馈电点位于短轴上距离中心点 f_x 距离处。为了扩展带宽,本文通过改变缝隙的尺

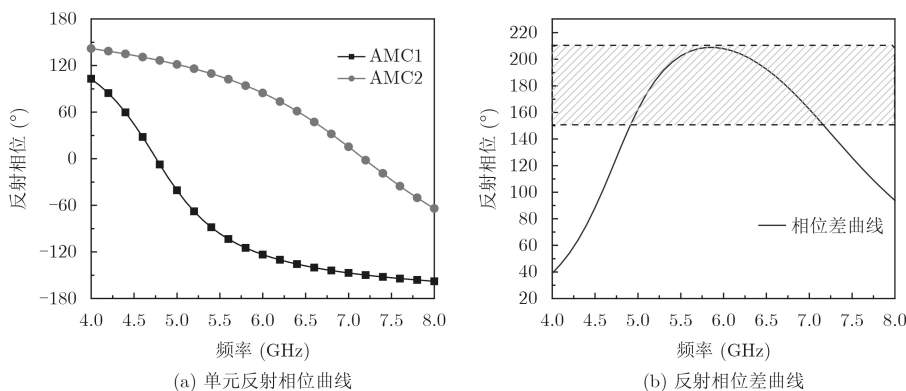


图3 AMC单元的反射相位特性曲线

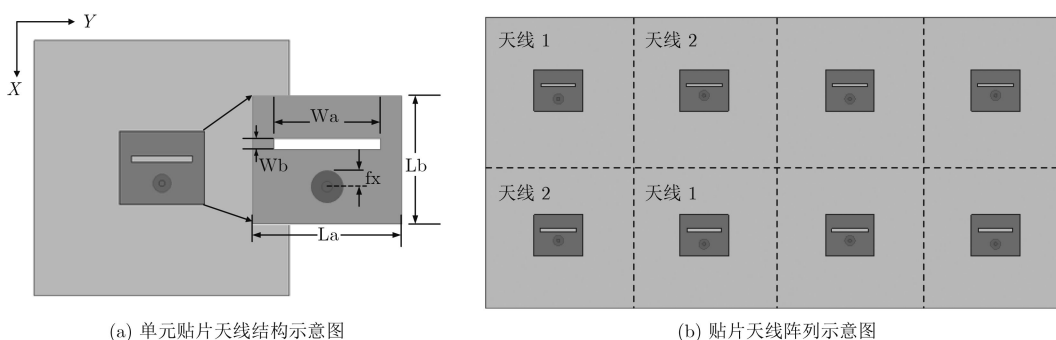


图4 开槽贴片天线结构示意图

寸、位置和馈电点位置来改变天线的工作频段，将工作在不同频段的两种天线1和天线2交叉组阵，如图4(b)所示，天线阵尺寸为42 mm×84 mm，经过优化仿真分析，得到其它具体数据如下：天线1的缝隙长 $W_{a1} = 10$ mm，宽 $W_{b1} = 1$ mm，距中心 $W_{x1} = 2$ mm，馈电点距离中心 $fx_1 = 2.5$ mm；天线2的缝隙长 $W_{a2} = 10.5$ mm，宽 $W_{b2} = 1$ mm，距中心 $W_{x2} = 2$ mm，馈电点距离中心 $fx_2 = 1.5$ mm。两种天线 S_{11} 曲线如图5所示，通过将两种工作在不同频段的窄带贴片天线组阵，使整个天线阵列在宽频带工作。

4 加载AMC的阵列天线设计

阵列天线是一类由不少于两个天线单元规则或

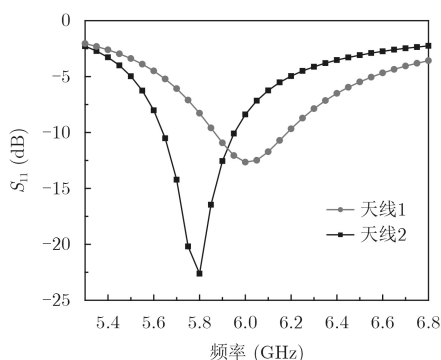


图5 天线 S_{11} 曲线

随机排列并通过适当激励获得预定辐射特性的特殊天线。阵列天线的辐射电磁场是组成该天线阵各单元辐射场的矢量和，由阵元的结构、数目、排列方式以及整个阵的电流幅度和相位分布等因素决定。由天线阵理论可知，为获得较高增益和主瓣波束，需要较大的排布间距，而过大的间距会引起较大的副瓣。因此，为获得阵列天线良好的辐射特性，设计优化阵元间距十分重要。同时超表面的加载也会对天线辐射性能产生一些作用。超表面的排布方式，会直接影响到与天线的耦合和天线阵阵元间距，从而影响到天线的工作带宽和方向图等性能。

为验证组阵可行性和超表面的加载对天线的影 响，首先分析单元天线性能。经过优化，加载超表面的两种天线结构如图6所示，在天线1周围排布方环AMC1，天线2周围排布风车型AMC2。加载AMC前后的单元天线 S_{11} 和增益曲线如图7所示。从图中可知，加载AMC后，天线1工作带宽由5.80~6.17 GHz扩宽到5.70~6.70 GHz，在5.5~6.8 GHz范围内天线增益均有提高；天线2的工作带宽略往低频偏移，在5.80~5.98 GHz范围内，天线增益基本保持不变，在其他工作频段内，增益均有所提高。单元天线的仿真结果表明，加载超表面后，两种单元天线的工作带宽和增益特性都有所改善，辐射性能保持良好，如图7所示。

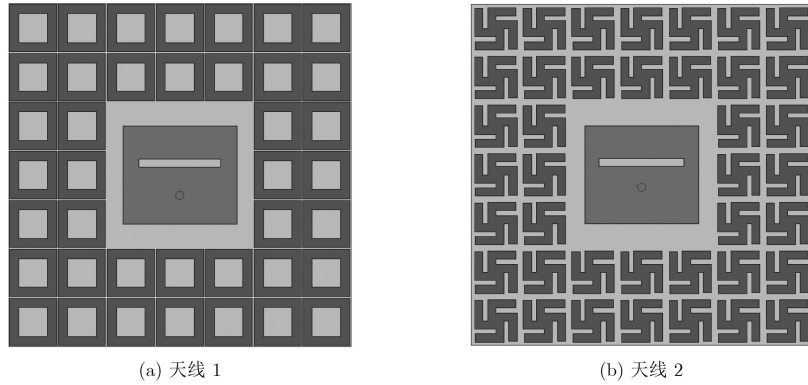


图6 加载AMC单元天线结构示意图

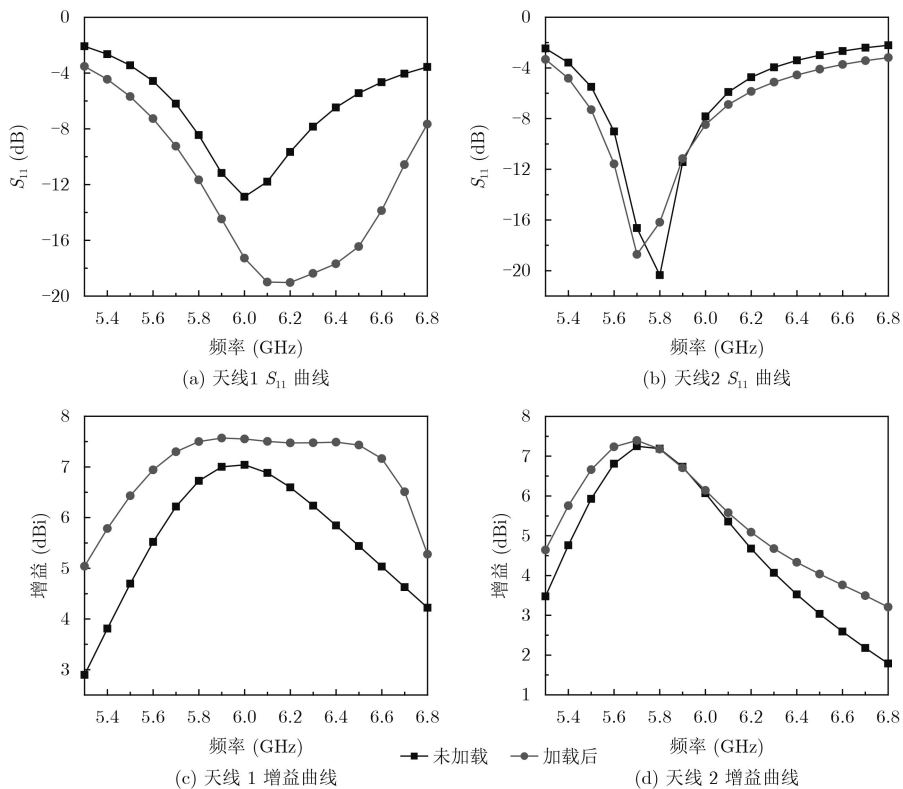


图7 单元天线辐射特性曲线

基于对上述单元天线的分析，综合考虑阵列天线的辐射性能和散射性能，将组成MS的两种AMC以棋盘布阵方式排布于天线阵阵元之间，MS与贴片天线之间留有一定距离，MS与参考天线共用地板。加载超表面的阵列天线结构如图8所示。

4.1 天线辐射性能

经仿真分析，可得天线S₁₁曲线和增益曲线如图9所示，未加载MS前天线的工作带宽为5.68~6.18 GHz，相对带宽为8.4%；加载MS后的天线带宽为5.62~6.58 GHz，相对带宽为16.4%。相较可知，超表面的加载使得天线的工作频段扩宽，相对带宽接近增加1倍。对比增益曲线，在6.05~6.15 GHz频率范围内，增益基本保持不变，在其他工作范围

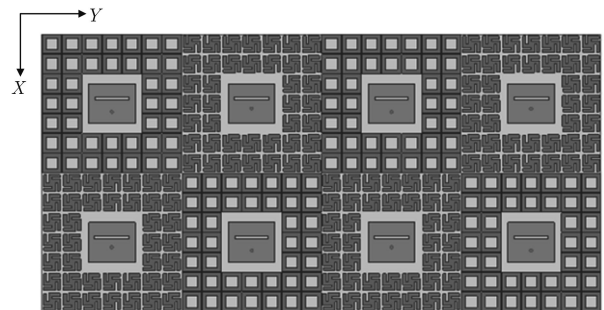


图8 加载MS阵列天线结构图

内，增益都有所提高。因此，加载超表面后，天线仍能保持良好的辐射性能。

图10~图12分别给出了加载超表面前后天线在

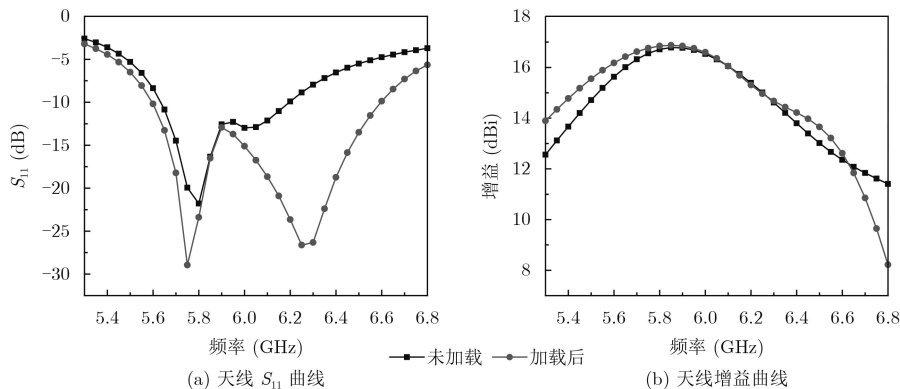


图9 天线辐射特性曲线

频率5.7 GHz, 6.0 GHz和6.4 GHz处的E面和H面方向图。由图对比可知, 加载超表面前后, 天线E, H面辐射方向图基本一致, 半功率波瓣宽度几乎不变。仿真结果表明, 天线加载MS后的辐射性能得到保持。

分析组阵前后的天线辐射性能可知, 组阵前两种原始天线单元的总工作带宽为5.63~6.20 GHz, 两种单元天线最大增益均在7 dBi左右, 组阵后原始天线阵的工作带宽为5.68~6.18 GHz, 最大增益为16.8 dBi; 组阵前两种加载AMC天线单元的总工作带宽为5.60~6.70 GHz, 两种单元天线最大增益均在7.5 dBi左右, 组阵后加载MS天线阵的工作带

宽为5.62~6.58 GHz, 最大增益为17 dBi。

对比可知, 将两种不同的天线单元组阵, 组阵前后的天线 S_{11} 范围存在一定的偏差, 组阵后加载MS天线阵的工作带宽相较于组阵前加载AMC天线单元缩减1.4 GHz, 组阵后原始天线阵的工作带宽相较于组阵前原始天线单元缩减0.7 GHz; 而天线阵增益也并没有随着阵元数目成倍增大。因此可知两种天线组阵后存在电磁波相互影响, 但天线阵整体性能保持良好。

4.2 天线的散射性能

图13给出了加载MS后的天线相较于原始天线

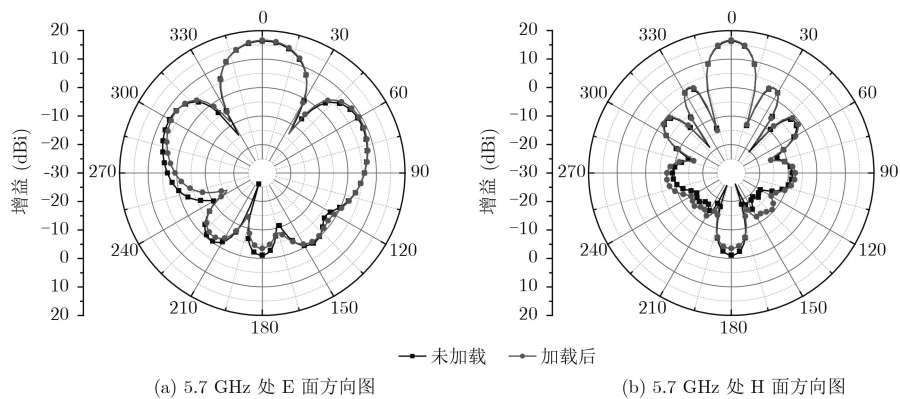


图10 天线5.7 GHz仿真方向图

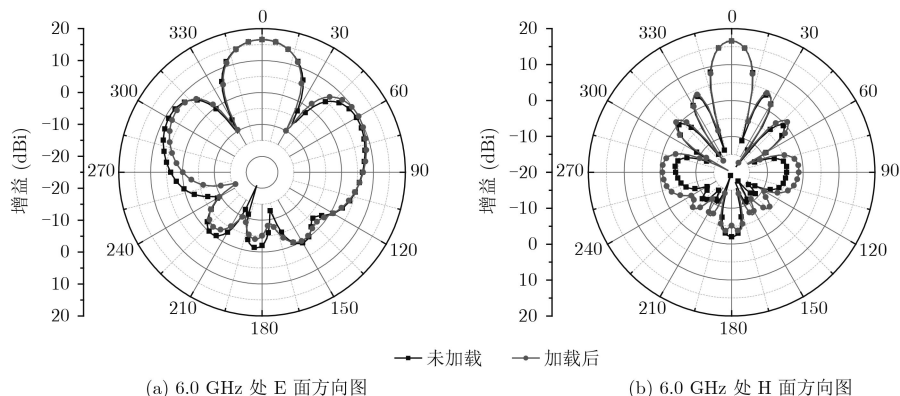


图11 天线6.0 GHz仿真方向图

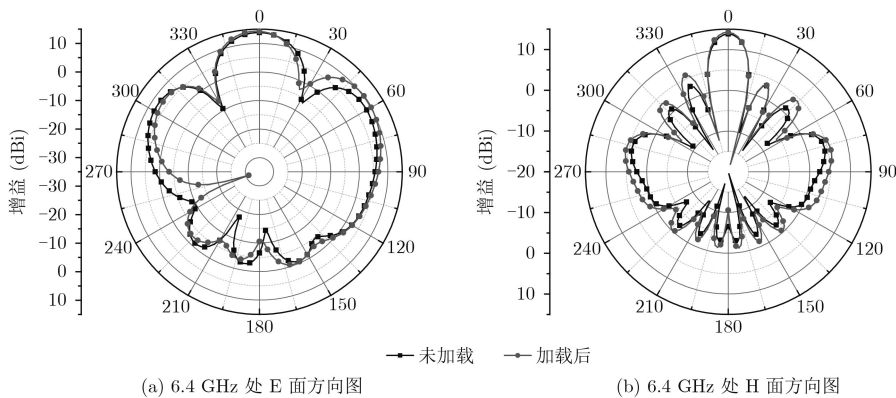


图 12 天线6.4 GHz仿真方向图

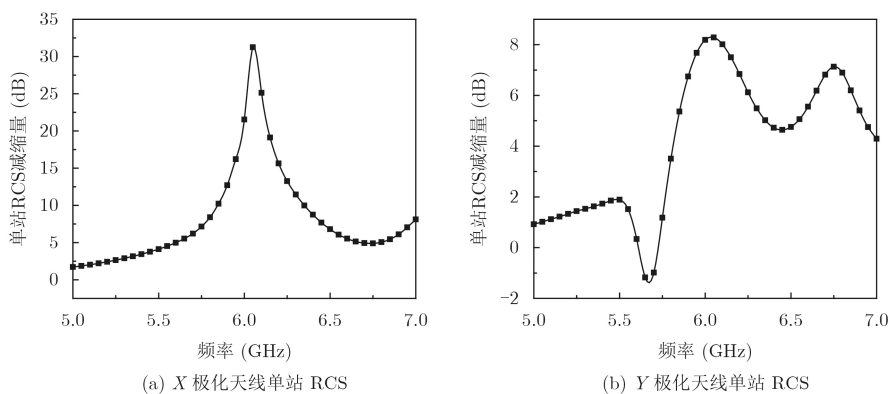
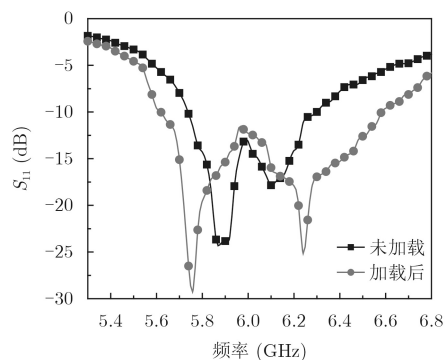


图 13 天线散射性能曲线

在X极化和Y极化平面波垂直入射时天线的法向RCS减缩量。由图可知,无论在X极化还是Y极化的平面波垂直入射时,加载MS后的天线RCS均得到了不同程度的减缩。X极化下在5.8~6.4 GHz频带内RCS减缩量达10 dB以上,最大减缩量达31 dB;在Y极化波入射下,由于组阵后整体天线结构的变化,天线阵的模式项散射在5.7 GHz处出现散射谐振点,导致在5.65~5.72 GHz范围内,加载MS后的天线RCS略比原始天线阵高,但在其他频段内RCS得到了有效减缩,在6.0 GHz处减缩量达到8.5 dB。

5 加工实测

对所仿真的超表面阵列天线进行加工实测,测试时采用一分八功分器对天线阵列进行馈电。天线的反射系数通过Agilent N5230C矢量网络分析仪进行实际测试,如图14所示,参考天线带宽为5.7~6.3 GHz,天线谐振点略往高频偏移,加载天线带宽为5.6~6.58 GHz,加载后天线带宽得到有效扩宽。天线辐射方向图如图15~图17所示,加载MS前后,天线方向图几乎完全重合,由实际测试结果可知,加载超表面前后的天线辐射特性几乎保持一致。天线反射系数和方向图实测与仿真之间存在的差异,主要是由天线加工误差和实际测试环境

图 14 实测的 S_{11} 曲线

等因素造成的。

天线的散射特性由矢量网络分析仪、两个喇叭天线等微波器件建立散射测试系统进行测试。分别对加载MS前后的天线进行实际测试,加载前后天线的RCS减缩量曲线如图18所示。从图中可以看出,在X、Y极化波垂直照射下,加载MS的天线相较于原始天线都有一定的RCS减缩量。在X极化波入射下,RCS的10 dB减缩带宽为5.85~6.3 GHz,在6.05 GHz处达到30.8 dB;在Y极化波入射下,RCS减缩量在6.0 GHz处达到最大值。对比仿真与实测数据,其中结果的差异可能是由加工误差和实际测试环境不理想造成的。

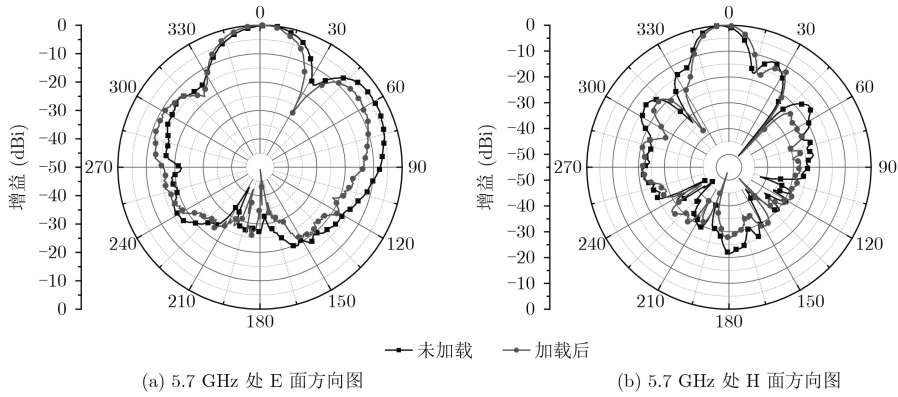


图 15 天线5.7 GHz实测方向图

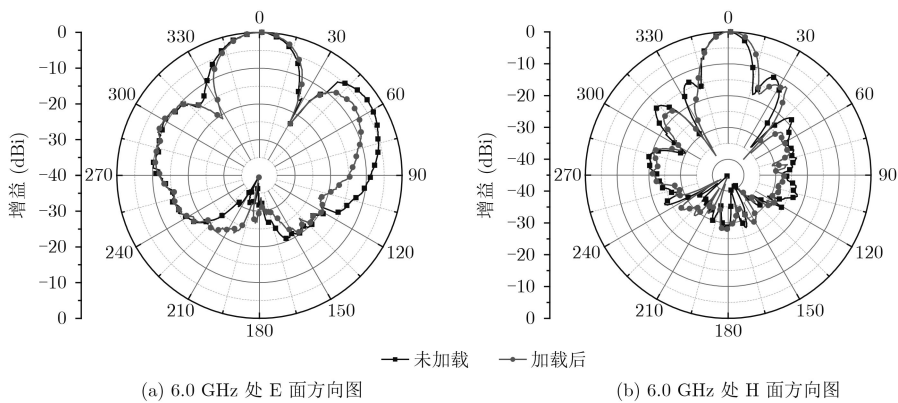


图 16 天线6.0 GHz实测方向图

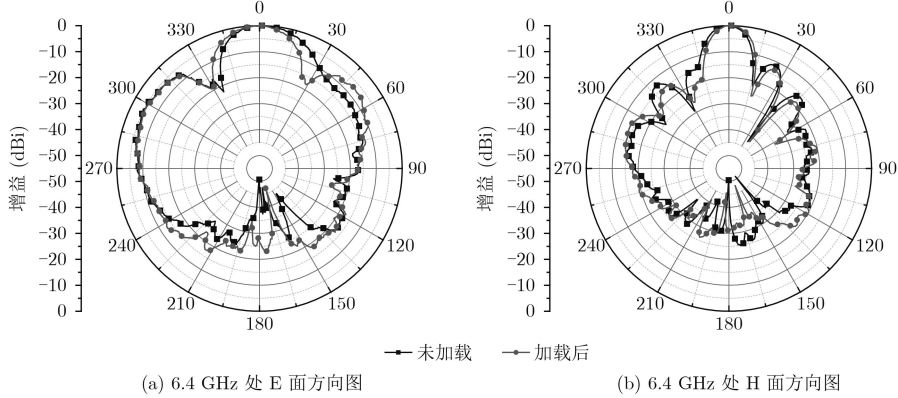


图 17 天线6.4 GHz实测方向图

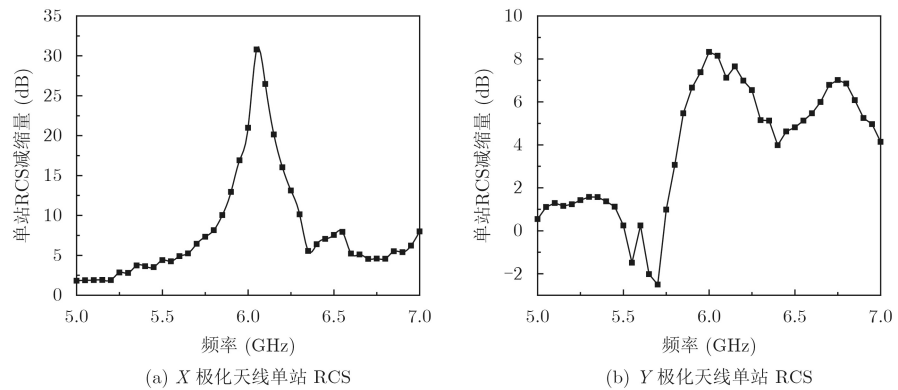


图 18 天线散射性能实测曲线

6 结论

本文设计了一种由工作在不同频段的两种贴片天线组成的 2×4 宽频天线阵,并将两种AMC单元以棋盘布阵的形式组成超表面加载到天线阵阵元之间,用以减缩天线阵RCS。实验结果表明:将超表面加载到天线阵阵元之间可有效扩宽天线工作带宽,实现带内和带外RCS减缩,改善其散射特性,同时天线阵的辐射特性保持良好。

参 考 文 献

- [1] LI Wenqiang, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Broadband RCS reduction and gain enhancement microstrip antenna using shared aperture artificial composite material based on quasi-fractal tree[J]. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 2016, 10(4): 370–377. doi: [10.1049/iet-map.2015.0311](https://doi.org/10.1049/iet-map.2015.0311).
 - [2] PAN Wenbo, HUANG Cheng, CHEN Po, *et al.* A low-RCS and high-gain partially reflection surface antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(2): 945–949. doi: [10.1109/TAP.2013.2291008](https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2291008).
 - [3] RAJESH N, MALATHI K, RAJU S, *et al.* Design of vivaldi antenna with wideband radar cross reduction[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(4): 2102–2105. doi: [10.1109/TAP.2017.2670566](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2670566).
 - [4] JIA Yongtao and LIU Ying. A low-RCS and high-gain circularly polarized antenna with a low profile[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2477–2480. doi: [10.1109/LAWP.2017.2725380](https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2725380).
 - [5] LIU Fei, HONG Tao, MA Jiannan, *et al.* A novel approach for dual-band microstrip antenna RCS reduction based on AMC structure[C]. Progress in Electromagnetic Research Symposium, Shanghai, China, 2016: 3023–3027. doi: [10.1109/PIERS.2016.7735182](https://doi.org/10.1109/PIERS.2016.7735182).
 - [6] STEFAN V, SOIRON M, BARKA A, *et al.* RCS reduction with a dual polarized self-complementary connected array antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(2): 567–575. doi: [10.1109/TAP.2016.2637860](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2637860).
 - [7] 许群, 刘少斌, 王云香, 等. 基于印刷振子和微带贴片的双极化天线单元研究[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(7): 1764–1768. doi: [10.11999/JEIT160758](https://doi.org/10.11999/JEIT160758).
XU Qun, LIU Shaobin, WANG Yunxiang, *et al.* Dual-polarized antenna based on printed dipole and microstrip patch[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(7): 1764–1768. doi: [10.11999/JEIT160758](https://doi.org/10.11999/JEIT160758).
 - [8] 丛丽丽, 付强, 曹祥玉, 等. 一种高增益低雷达散射截面的新型圆极化微带天线设计[J]. 物理学报, 2015, 64(22): 22421901–22421909. doi: [10.7498/aps.64.224219](https://doi.org/10.7498/aps.64.224219).
CONG Lili, FU Qiang, CAO Xiangyu, *et al.* A novel circularly polarized patch antenna with low radar cross section and high-gain[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(22): 22421901–22421909. doi: [10.7498/aps.64.224219](https://doi.org/10.7498/aps.64.224219).
 - [9] LI Aobo, SANGHOON K, LUO Yong, *et al.* High-power transistor-based tunable and switchable metasurface absorber[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(8): 2810–2818. doi: [10.1109/TMTT.2017.2681650](https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2681650).
 - [10] ZHENG Yuejun, GAO Jun, CAO Xiangyu, *et al.* Wideband RCS reduction of a microstrip antenna using artificial magnetic conductor structures[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 1582–1585. doi: [10.1109/LAWP.2015.2413456](https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2413456).
 - [11] KANG Xiaole, SU Jianxun, ZHANG Hui, *et al.* Ultra-wideband RCS reduction of microstrip antenna array by optimized multi-element metasurface[J]. *Electronics Letter*, 2017, 53(8): 520–522. doi: [10.1049/el.2017.0260](https://doi.org/10.1049/el.2017.0260).
 - [12] XUE Jingjing, JIANG Wen, and GONG Shuxi. Wideband RCS reduction of microstrip antenna based on 2.5-dimension miniaturized frequency selective surface[C]. IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, Taipei, China, 2016: 209–210. doi: [10.1109/APCAP.2016.7843172](https://doi.org/10.1109/APCAP.2016.7843172).
 - [13] 周禹龙, 曹祥玉, 高军, 等. 双频频率选择表面及其在微带天线宽带RCS减缩中的应用[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(6): 1446–1451. doi: [10.11999/JEIT160854](https://doi.org/10.11999/JEIT160854).
ZHOU Yulong, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Dualband frequency selective surface and its application to wideband RCS reduction of the microstrip antenna[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(6): 1446–1451. doi: [10.11999/JEIT160854](https://doi.org/10.11999/JEIT160854).
 - [14] HAN Zijian, SONG Wei, and SHENG Xinqing. Gain enhancement and RCS reduction for patch antenna by using polarization-dependent EBG surface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 1631–1634. doi: [10.1109/LAWP.2017.2658195](https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2658195).
 - [15] SU Jianxun, KONG Chuiyong, LI Zengrui, *et al.* Wideband diffuse scattering and RCS reduction of microstrip antenna array based on coding metasurface[J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(16): 1088–1090. doi: [10.1049/el.2017.1656](https://doi.org/10.1049/el.2017.1656).
- 王思铭: 女, 1993 年生, 博士生, 研究方向为阵列天线、电磁超表面等。
高 军: 男, 1962 年生, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电磁散射理论、电磁超材料、天线设计等。
曹祥玉: 女, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为天线与电磁兼容、电磁超材料、计算电磁学等。
郑月军: 男, 1989 年生, 博士生, 研究方向为天线设计、人工电磁材料等。
兰俊祥: 男, 1994 年生, 博士生, 研究方向为磁电偶极子天线、超宽带吸波体等。