

共享孔径超表面设计及其在提升波导缝隙天线
辐射和散射性能中的应用

韩 彤, 曹祥玉✉, 高 军, 赵 一
(空军工程大学信息与导航学院,西安,710077)

摘要 根据平面阵列散射理论和天线共享孔径思想,提出了一种由完美吸波体(PMA)和人工磁导体(AMC)交错构成的共享孔径超表面(SA-MS),可在同一孔径面上同时实现对电磁波的吸收和相位抵消。仿真结果表明由于吸波频段与相位抵消频段的级联,该 SA-MS 相比理想导体(PEC)、PMA、AMC-PEC 具有宽带雷达散射截面(RCS)减缩效果。而后将该 SA-MS 与波导缝隙天线一体化设计并加工,仿真与实测结果表明:与金属面天线相比,SA-MS 天线增益提升了 3.3 dB,同时 RCS 在 5.52~7.51 GHz 范围内的减缩在 6 dB 以上,减缩带宽达到 30.5%, x 、 y 极化条件下最大减缩量分别达到 20.5 dB 和 20.2 dB,验证了设计的 SA-MS 对天线的辐射和散射性能均有提升。

关键词 共享孔径超表面;波导缝隙天线;高增益;宽带 RCS 减缩

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.03.016

中图分类号 TN82 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)03-0031-07

A Design of Shared Aperture Metasurface and Its Application on Improving
Radiation and Scattering Performance at the Waveguide Slot Antenna

HAN Tong, CAO Xiangyu, GAO Jun, ZHAO Yi
(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Based on the theory of planar array scattering and the idea of antenna shared aperture, this paper proposes a design of shared aperture metasurface (SA-MS) composed by perfect metamaterial absorber (PMA) and artificial magnetic conductor (AMC) in stagger arrangement The SA-MS not only can achieve wave-absorbing, but also has the function of phase counteraction. The simulation results indicate that the SA-MS can achieve broadband radar cross section (RCS) reduction compared with the surface of perfect electronic conductor (PEC), PMA and PEC-AMC due to cascade connection of frequency band between PMA and AMC. Then the SA-MS and waveguide slot antenna are integrated and fabricated. The simulation and measured results show that the gain of proposed antenna increases by 3.3 dB compared with the reference antenna. At the same time, the RCS of SA-MS antenna is reduced by more than 6 dB at the

收稿日期: 2016-11-22
基金项目: 国家自然科学基金(61271100;61471389;61501494;61671464)
作者简介: 韩 彤(1993—),男,山西运城人,硕士生,主要从事人工电磁材料、天线设计研究. E-mail:15594806122@163.com
通讯作者: 曹祥玉(1964—),女,河南南阳人,教授,博士生导师,主要从事计算电磁学、天线与电磁兼容、电磁超材料研究. E-mail:xiangyucaokdy@163.com

引用格式: 韩彤,曹祥玉,高军,等. 共享孔径超表面设计及其在提升波导缝隙天线辐射和散射性能中的应用[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(3): 31-37. HAN Tong, CAO Xiangyu, GAO Jun, et al. A Design of Shared Aperture Metasurface and Its Application on Improving Radiation and Scattering Performance at the Waveguide Slot Antenna[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(3): 31-37.

range of 5.52~7.51 GHz, and the relative bandwidth is 30.5%. The largest RCS reduction reaches 20.5 dB and 20.2 dB on the condition of x polarization and y polarization respectively. The SA-MS can improve both the radiation and scattering performance of the antenna.

Key words: shared aperture metasurface; waveguide slot antenna; high gain; broadband RCS reduction

随着隐身技术的发展,天线雷达散射截面(RCS)减缩技术的研究受到广泛关注。其中在天线系统中引入雷达吸波材料(RAM)为一种有效方法,其原理是利用分子的震荡使入射波能量发生耗散,从而实现 RCS 减缩,但天线作为一个辐射系统,涂敷 RAM 后天线的辐射性能会显著降低,从而削弱了其工程应用的价值。

电磁超表面(MS)是近几年发展出来的新颖人工合成材料。它由周期或准周期微结构组成,具有电磁带隙^[1]、高阻抗^[2]、极化旋转^[3-6]、漫散射^[7-8]和表面等离子激元^[9-10]等奇异电磁特性,加之其超薄的物理尺寸,为降低天线的雷达散射截面(RCS)提供了新的途径。Paquay 等曾在 2007 年提出将人工磁导体(AMC)与理想导体(PEC)棋盘式排布^[11],利用二者反射的电磁波相位相差 180°,使垂直入射的电磁波在反射面相位抵消,从而使目标 RCS 显著降低。文献[12]在此基础上,将 PEC 表面替换为 AMC,即同时设计 2 种不同结构的 AMC,使两者在 8.2~19.6 GHz 频带内实现相位的有效抵消,并将此 AMC 反射屏与微带天线相结合,在保证天线辐射性能的同时使天线带内带外的 RCS 得到显著降低,RCS 最大减缩量达到 31.9 dB。随后研究人员通过调控 MS 单元的电谐振和磁谐振,使其与自由空间实现阻抗匹配,制备出对电磁波近 100% 吸收的结构型 PMA 并将其用于 1×4 的微带贴片天线阵^[13],阵列天线的辐射性能基本保持不变,带内 RCS 能获得 9 dB 以上减缩。文献[14]还设计了一种双频超薄 PMA 并将其应用于微带天线,在天线的工作频率 4.29 GHz 和 6.49 GHz 处的 RCS 分别减缩 8.6 dB 和 9.9 dB,为双频带天线的带内 RCS 减缩提供了新思路。在此基础上,研究人员针对 PMA 的宽入射角^[15-16]、极化无关^[17-19]、多频带特性^[20]又提出了众多新颖的结构,从而进一步拓宽了 PMA 的应用范围。

“共享孔径”^[21-22]是在相控阵天线设计中涌现出的一种设计思想。即通过共享一副天线孔径来同时完成之前由多种天线才能完成的功能。事实上,此思想也可推广到 MS 设计之中,即首先利用共享孔径对 MS 布阵,使其在同一孔径上实现多种电磁特性,然后调整子孔径频段使其相互叠加,实现 MS 的宽频带工作。基于以上思想,本文将 AMC 与

PMA 应用于同一孔径,制备出具有吸波和相位抵消 2 种特性的共享孔径超表面,实现其对入射电磁波的宽带 RCS 减缩。在此基础上,将此超表面应用于波导缝隙天线,经仿真与实验验证,天线增益提升 3.3 dB,在 5.52~7.51 GHz 范围内使天线 RCS 减缩至少 6 dB,相对带宽达到 30.5%,有效解决了天线辐射与散射性能不能兼顾的问题。

1 理论分析

图 1 为 SA-MS 平面阵列等效模型^[11],利用它可对由 AMC 阵元和 PMA 阵元构成的 SA-MS 的 RCS 特性进行理论估计。

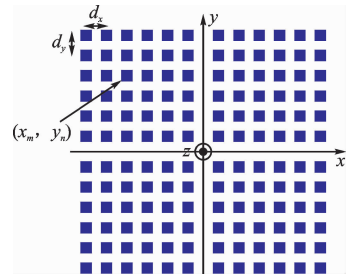


图 1 SA-MS 平面阵列等效模型

Fig. 1 Planar array equivalent model of SA-MS

用每个方块代表 PMA、AMC 子孔径单元, d_x 代表 x 方向阵元间距,阵元数目为 M , d_y 代表 y 方向阵元间距,阵元数目为 N ,可得阵列中阵元的位置坐标为:

$$\begin{aligned} x_m &= \left(m - \frac{M+1}{2}\right)d_x \quad m = 1, 2, \dots, M \\ y_n &= \left(n - \frac{N+1}{2}\right)d_y \quad n = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (1)$$

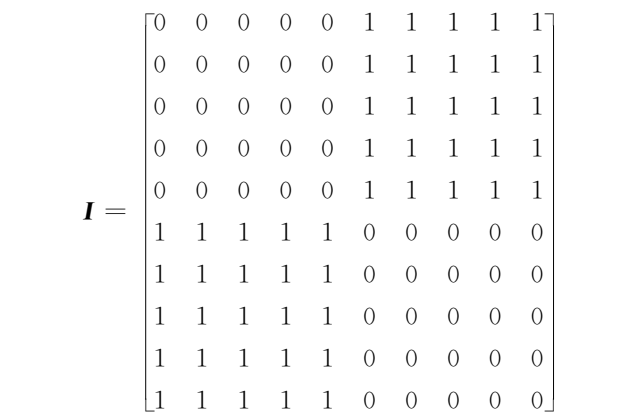
任意单元 (x_m, y_n) 的阵元因子为:

$$AF = F_{xmm}(\theta, \varphi)F_{ynm}(\theta, \varphi)e^{j\Psi_{mm}} = e^{jn\Omega_x}e^{jm\Omega_y}e^{j\Psi_{mm}} \quad (2)$$

式中: $\Omega_x = kd_x \sin\theta \cos\varphi$; $\Omega_y = kd_y \sin\theta \sin\varphi$; Ψ_{mm} 代表该阵元的反射相位信息。将 PMA、AMC 的阵元因子叠加,可得 SA-MS 平面阵列的方向图表达式:

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N F_{mm}(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N e^{jn\Omega_x}e^{jm\Omega_y}e^{j\Psi_{mm}} \quad (3)$$

若利用矩阵代替 PMA、AMC 阵元的相对位置信息,可以预估 SA-MS 在 2 个减缩频点处的三维散射方向图。文中所设计的 SA-MS 的等效矩阵可以写为:



其中 1 代表 AMC 阵元,0 代表 PMA 阵元。对于 SA-MS,当 PMA 谐振时,PMA 在相应空域对电磁波近 100%吸收,AMC 对电磁波近乎完全反射,故散射场在 PMA 相应空域显著减小,在 AMC 相应空域辐射较强,见图 2(a);当 AMC 与 PMA 相位抵消时,中心散射场被抵消,此时的 SA-MS 的主要散射被分散到四角方向,见图 2(b)。

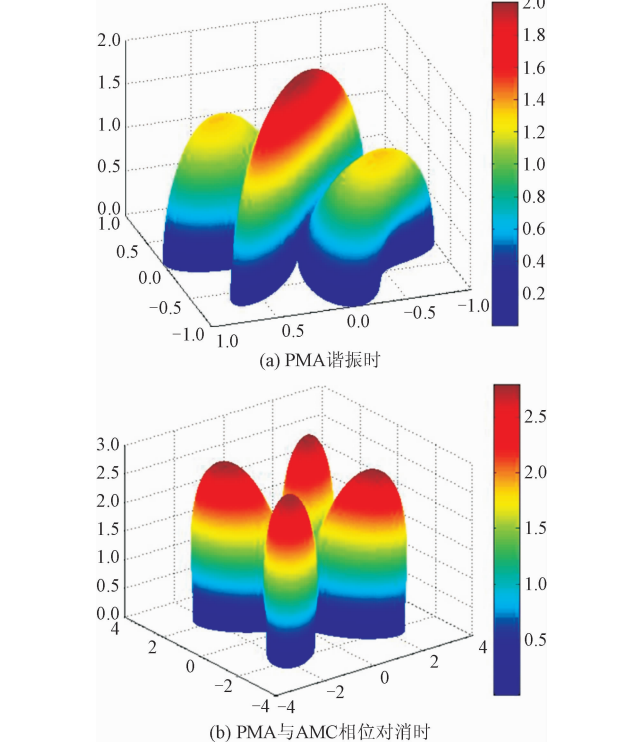


图 2 SA-MS 三维理论散射场

Fig. 2 Three-dimensional scattering pattern of SA-MS in theory

2 SA-MS 结构设计

基于上述理论,本文设计的 SA-MS 见图 3。其中 PMA 单元由上层经刻蚀的金属贴片、中间层介质和下层金属地板构成。单元周期 $a_1=9\text{ mm}$,贴片边长 $b_1=8\text{ mm}$,阶梯缝隙 $l_1=7.5\text{ mm}$, $l_2=2.5\text{ mm}$, $w_1=1.6\text{ mm}$, $w_2=1.25\text{ mm}$,介质厚度为 0.5

mm,介电常数为 4.4;AMC 单元由上层正方形贴片,中间层介质和下层金属地板构成。单元周期 $a_2=9\text{ mm}$,贴片边长 $b_2=7.8\text{ mm}$,介质厚度为 2 mm ,介电常数为 2.65。

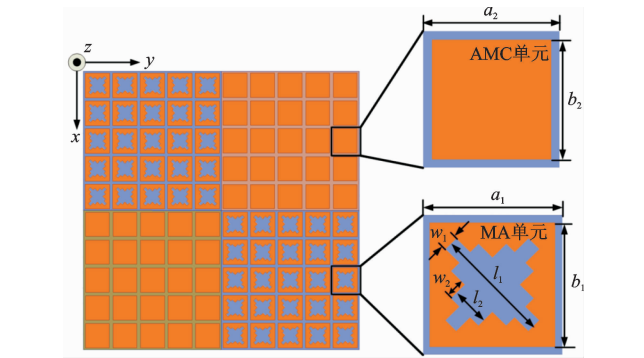


图 3 SA-MS 及其单元结构示意图

Fig. 3 SA-MS and the diagram of its unit structures

仿真软件采用基于有限元方法的 AnsoftHF-SS14.0,利用主/从边界和 Floquet 端口模拟无限周期单元。PMA 单元和 AMC 单元反射特性的仿真结果见图 4(a)、(b)。可以看出,当 MA 单元谐振,即在 5.9 GHz 时其反射幅度为 0,反射相位为 0° 。此时 AMC 的反射幅度趋于 1,反射相位 118° 。当 AMC 单元谐振,即在 7.2 GHz 时其反射幅度趋向于 1,反射相位为 0° ,此时 PMA 的反射幅度趋于 1,反射相位 179° 。

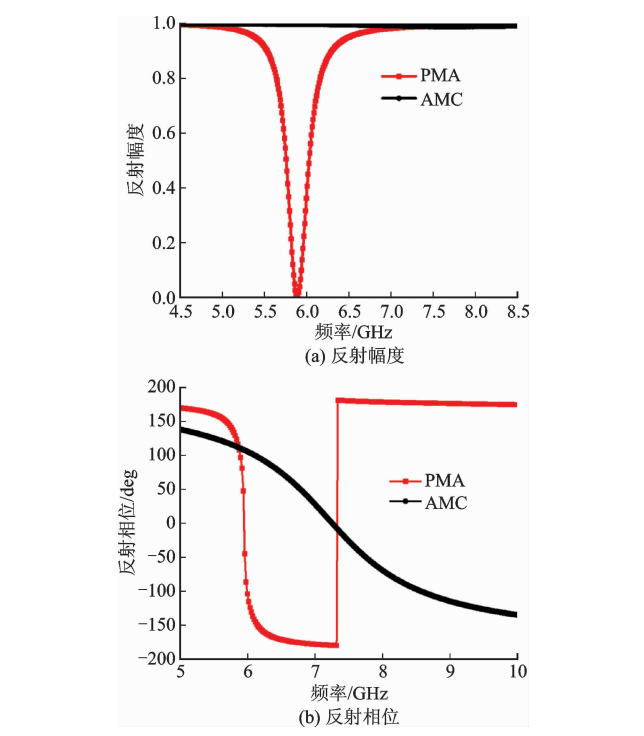


图 4 单元反射特性

Fig. 4 Unit reflection characteristics

用平面波垂直照射等尺寸大小的 PMA、PEC、

AMC-PEC 和 SA-MS,得到四者的单站 RCS 随频率变化曲线见图 5。SA-MS 与 PEC 比较,其 RCS 在 5.41~8.80 GHz 频率范围内有明显减缩;与 PMA 比较,其 RCS 减缩带宽明显展宽;与 AMC-PEC 比较,增多了 1 个吸波减缩点。表 1 给出了 3 种超表面相对金属面的 RCS 减缩带宽对比,可以看出设计的 SA-MS 相比只有一种超表面的反射板,其 RCS 减缩性能得到明显提升。

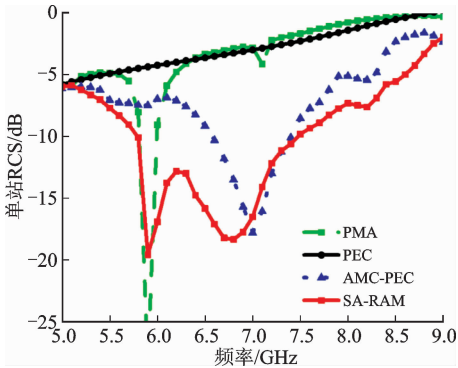


图 5 SA-MS 及其他反射表面单站 RCS
Fig. 5 Monostatic RCS of SA-MS and the other three surfaces

表 1 3 种超表面相对金属面 RCS 减缩带宽

Tab.1 RCS reduction bandwidth of three metasurfaces compared with the metal

超表面	PMA	AMC-PEC	SA-MS
3 dB 减缩带宽	5.78~6.06 GHz	6.34~8.36 GHz	5.41~8.80 GHz
相对带宽	0.05%	27.5%	47.7%

对图 5 中 SA-MS 的单站 RCS 曲线的 2 个减缩峰值点:5.9 GHz 和 6.8 GHz 分别进行仿真,得到三维散射方向图见图 6。观察可以发现,5.9 GHz 对应于图 2(a),散射场整体较小,RCS 减缩是由 PMA 的吸波引起;6.8 GHz 对应于图 2(b),散射场为 4 个波束,RCS 减缩是由 AMC 与 PMA 的相位对消引起。可见仿真结果与理论分析的一致性较好,证明了设计方法的正确性。

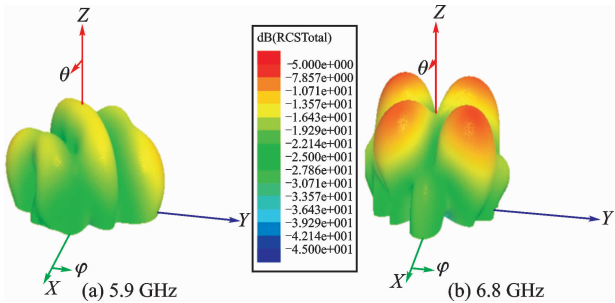


图 6 SA-MS 三维仿真散射场
Fig. 6 Three-dimensional scattering pattern of SA-MS in simulation

3 SA-MS 用于波导缝隙天线

为探究该 SA-MS 对天线性能的提升作用,将其与波导缝隙天线一体化设计,见图 7。缝隙尺寸 $l \times w = 24.6 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,天线的金属辐射板尺寸 $135 \text{ mm} \times 135 \text{ mm}$,采用标准的 C 波段波导(WJB-58,40.4 mm×20.2 mm)馈电。为保证天线的辐射性能,保留缝隙周围的金属区域。

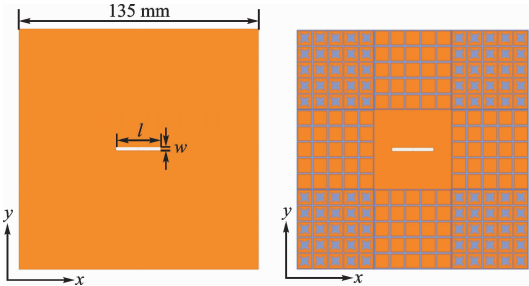


图 7 原始天线与设计天线

Fig. 7 Original antenna and proposed antenna

首先对 2 种天线的辐射性能进行仿真,得到天线反射系数曲线见图 8。由图可得,原始天线的谐振中心频率在 5.94 GHz 处,加载 SA-MS 后天线谐振中心频率在 5.96 GHz 处,向高频偏移 20 MHz。

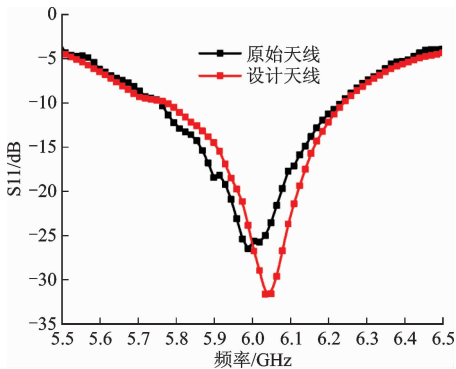


图 8 天线反射系数对比图

Fig. 8 Diagram of antenna reflection coefficient

图 9(a)、(b)给出了天线在谐振频点处加载 SA-MS 前后波导缝隙天线的二维增益方向图,由图可以看出,加载 SA-MS 后天线的增益由原来的 6.27 dBi 上升到 9.55 dBi,提高了 3.28 dB,其中原因可由图 10 给出的天线表面电场得知:可以看出当天线金属面设计为 SA-MS 后,在 PMA 子孔径处被辐射缝隙激励起更强的表面电场,增大了原始天线的有效辐射口径,因而增益获得提升。

图 11 给出了加载 SA-MS 前后天线在 x 极化和 y 极化条件下平面电磁波垂直照射时的单站 RCS 随频率变化曲线。由图 11(a)可以看出对于 x 极化条件,加载 SA-MS 后天线的带内带外 RCS 都

有了明显的减缩,分别在 5.9 GHz、6.8 GHz 处出现了明显的 RCS 减缩峰值。最大减缩量为 12.2 dB;由图 11(b)可以看出在 y 极化条件下,在 5.6~7.5 GHz 频率范围内有 3 dB 以上的 RCS 减缩,且分别在 5.9 GHz、6.8 GHz 处出现了明显的 RCS 减缩峰值,最大减缩量为 17.5 dB。可以看出由于 SA-MS 具有旋转对称性,因此加载 SA-MS 后天线在 2 种极化条件下具有相似的散射特性。

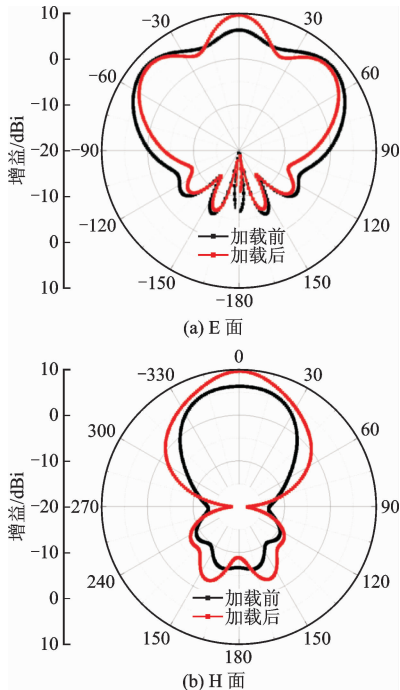


图 9 仿真二维增益方向图

Fig. 9 Simulated two-dimensional gain pattern

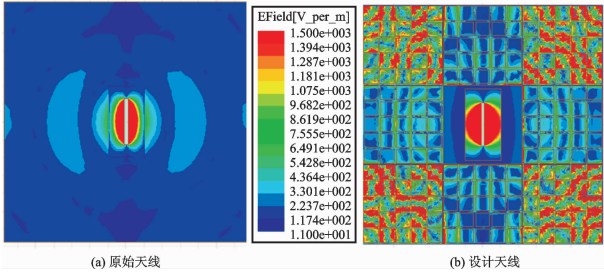


图 10 表面电场分布图

Fig. 10 Surface E-field distributions

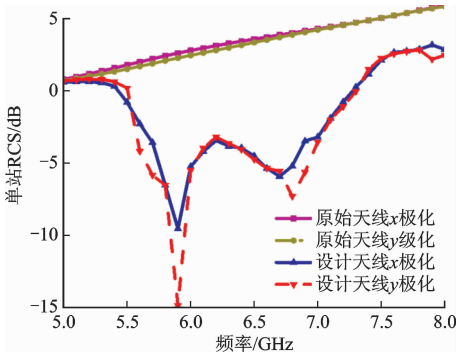


图 11 原始天线与设计天线单站 RCS

Fig. 11 Monostatic RCS of original antenna and proposed antenna

4 实物测试

本文按照仿真设计进行实物加工和测试,馈电选用 C 波段的标准波导,采用印刷电路板方法将 SA-MS 与波导缝隙天线一体化加工,最后将设计天线用螺丝固定在馈电波导上。设计天线及辐射测试环境见图 12。

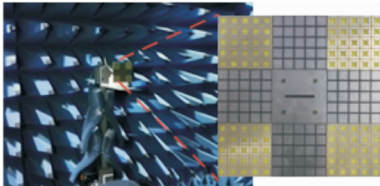


图 12 设计天线及辐射测试环境

Fig. 12 Proposed antenna and radiation measuring environment

利用型号为 AligentN5230C 的矢量网络分析仪测试得到天线的反射系数曲线见图 13。测试结果表明,设计天线和原始天线的谐振中心相比仿真都向高频略微偏移,设计天线的谐振中心相比原始天线向高频偏移 70 MHz,分析可能是由于加工误差和测试误差造成的。

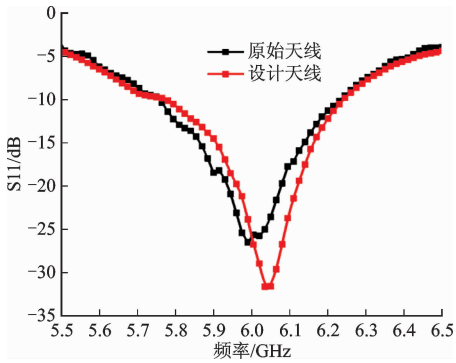


图 13 实测反射系数

Fig. 13 Measured reflection coefficient

图 14 为实测得到的天线辐射方向图,可以发现天线的辐射性能得到一定提高,前向增益提升 3.3 dB,与仿真结果基本吻合。

为了测量天线的散射,利用矢量网络分析仪、2 个喇叭天线等微波器件建立散射测试系统,见图 15。分别对原始天线和设计天线进行测试,得到的反射损耗曲线见图 16。观察发现,在 5.52~7.51 GHz 频段内设计天线的 RCS 减缩达到 6 dB 以上,减缩带宽达到 30.5%,在 5.9 GHz 和 6.8 GHz 左右处出现减缩峰值点,与仿真结果吻合良好。综合来看,实测天线 RCS 的曲线与仿真基本相同,且减缩频带都覆盖了天线的工作带宽,说明本文设计的 SA-MS 可以有效减缩波导缝隙天线的 RCS。其中

测试和仿真结果的差异可能是由加工误差和测试环境不完全理想造成的。

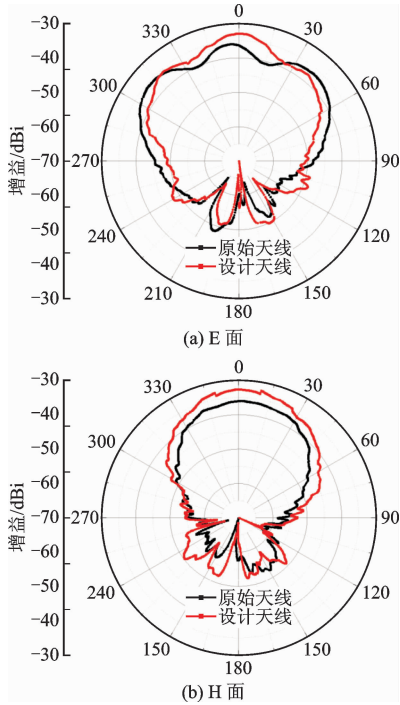


图 14 实测二维增益方向图

Fig. 14 Measured two-dimensional gain pattern

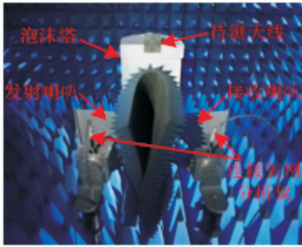


图 15 天线散射性能测试

Fig. 15 Measurement of antenna scattering performance

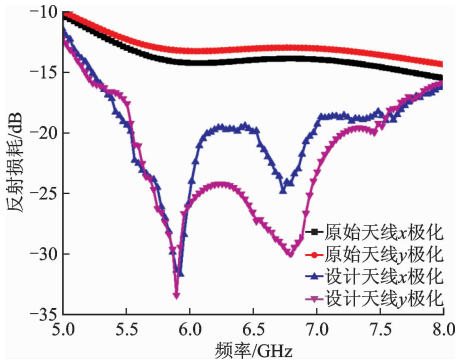


图 16 实测反射损耗

Fig. 16 Measured reflection ullage

5 结语

本文依据平面阵列散射理论,基于天线共享孔

径思想,设计了一种兼具吸波和相位对消特性的低 RCS 超表面 SA-MS。将其与波导缝隙天线一体化设计并制备 SA-MS 天线实物,仿真与实验结果表明 SA-MS 天线的辐射和散射性能同时得到改善,证明了该超表面在减缩天线 RCS 中具有重要的应用价值。

参考文献(References):

[1] KNIGHT J C, BROENG J, BIRKS T A, et al. Photonic Band Gap Guidance in Optical Fiber [J]. Science, 1998, 282(5393): 1476-1478.

[2] 龚琦, 张帅, 龚书喜, 等. 利用高阻抗表面减缩天线雷达散射截面的新方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(3): 134-140.

GONG Q, ZHANG S, GONG S X, et al. Application of the High Impedance Surface for RCS Reduction of the Antenna [J]. Journal of Xidian University, 2012, 39(3): 134-140. (in Chinese)

[3] ZHOU H, HONG W, TIAN L, et al. A Polarization-rotating SIW Reflective Surface with Two Sharp Band Edges [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016(15): 401-403.

[4] 韩江枫, 曹祥玉, 高军, 等. 一种基于超材料的宽带、反射型 90°极化旋转体设计 [J]. 物理学报, 2016, 65(4): 044201.

HAN J F, CAO X Y, GAO J, et al. Design of Broadband Reflective 90° Polarization Rotator Based on Metamaterial [J]. Acta Phys Sin, 2016, 65(4): 044201. (in Chinese)

[5] YANG W C, TAM K W, CHOI W W, et al. Novel Polarization Rotation Technique Based on an Artificial Magnetic Conductor and Its Application in a Low-profile Circular Polarization Antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(12): 6206-6216.

[6] JIA Y T, LIU Y, JAY G, et al. Broadband Polarization Rotation Reflective Surfaces and Their Applications to RCS Reduction [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(1): 179-188.

[7] ZHAO Y, CAO X Y, GAO J, et al. Jigsaw Puzzle Metasurface for Multiple Functions: Polarization Conversion, Anomalous Reflection and Diffusion [J]. Optical Society of America, 2016, 24(10): 261803.

[8] ZHAO Y, CAO X Y, GAO J, et al. Broadband Diffusion Metasurface Based on a Single Anisotropic Element and Optimized by the Simulated Annealing Algorithm [J]. Scientific Reports, 2016(6): 23896.

[9] MA H F, SHEN X P, CHENG Q, et al. Broadband and High-efficiency Conversion from Guided Waves to Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. Laser and

- Photonics Review, 2014, 8(1): 146-151.
- [10] LI S J, CAO X Y, GAO J, et al. Polarization-insensitive Ultra-thin Quasi-metasurface Based on the Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. Applied Physics A, 2016, 122: 857.
- [11] PAQUAY M, IRIARTE J C, EDERRA I, et al. Thin AMC Structure for Radar Cross Section Reduction [J]. IEEE Trans. Antennas Propag, 2007, 55 (12): 3630-3638.
- [12] ZHENG Y J, GAO J, CAO X Y, et al. Wideband RCS Reduction of a Microstrip Antenna Using Artificial Magnetic Conductor Structures [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015 (14): 1582.
- [13] 王夫蔚, 龚书喜, 张鹏飞. 结构型吸波材料在阵列天线 RCS 减缩中的应用 [J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(5): 116-120.
WANG F W, GONG S X, ZHANG P F. Radar Absorbing Material Applied to the RCS Reduction of Array Antennas [J]. Journal of Xidian University, 2012, 39(5): 116-120. (in Chinese)
- [14] 高军, 张浩, 曹祥玉, 等. 一种双频超薄吸波结构在微带天线中的应用 [J]. 西安电子科技大学学报, 2015, 42(1): 130-135.
GAO J, ZHANG H, CAO X Y, et al. Dual-band Ultra-thin Metamaterial Absorber and Its Application in Reducing RCS of the Microstrip Antenna [J]. Journal of Xidian University, 2015, 42(1): 130-135. (in Chinese)
- [15] XU Y Q, ZHOU P H, ZHANG H B, et al. A Wide-angle Planar Metamaterial Absorber Based on Split Ring Resonator Coupling [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(4): 044102.
- [16] LI L, YANG Y, LIANG C H. A Wide-angle Polarization-insensitive Ultra-thin Metamaterial Absorber with Three Resonant Modes [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(6): 063702.
- [17] CAO T, WEI C W, SIMPSON R E, et al. Broadband Polarization-independent Perfect Absorber Using a Phase-change Metamaterial at Visible Frequencies [J]. Scientific Reports, 2014(4): 3955.
- [18] LI S J, GAO J, CAO X Y, et al. Polarization-insensitive and Thin Stereo-metamaterial with Broadband Angular Absorption for the Oblique Incidence [J]. Applied Physics A (Materials Science & Processing), 2015, 119(1): 371-378.
- [19] CHENG Y Z, NIE Y, GONG R Z. A Polarization-insensitive and Omnidirectional Broadband Terahertz Metamaterial Absorber Based on Coplanar Multi-squares Films [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 48(10): 415-421.
- [20] LI S J, GAO J, CAO X Y, et al. Multiband and Broadband Polarization-insensitive Perfect Absorber Devices Based on a Tunable and Thin Double Splitting Metamaterial [J]. Optics Express, 2015, 23 (3): 3523-3533.
- [21] CHU Q X, MA H Q, ZHENG H L. Design of Shared Aperture Wideband Antennas Considering Band-Notch and Radiation Pattern Control [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56 (11): 3391-3395.
- [22] NAISHADHAM K, LI R L, YANG L, et al. A Shared-aperture Dual-band Planar Array with Self-similar Printed Folded Dipoles [J]. IEEE Transaction on Antenna and Propagation, 2013, 61(2): 606-613.

(编辑: 徐楠楠)