

基于三种反射型单元共享孔径的新型宽带低RCS反射屏设计

张国雯 高军* 曹祥玉 杨欢欢 李思佳

(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3种反射型单元共享孔径的新型宽带低RCS超表面反射屏, 与传统人工磁导体反射屏相比, 引入一种相量干涉单元, 利用新型相位对消关系完成了对传统人工磁导体(AMC)反射屏相位对消频带的拓展。通过将3种反射单元交错排布, 合理设计阵列使其满足新型相位对消条件, 并进一步优化单元结构参数, 实现了阵列RCS缩减和缩减带宽的拓展。在不同极化波垂直入射条件下, 新型阵列均有较好的低散射性能。仿真与实测结果表明: 在5.2~13.9 GHz范围内后向RCS缩减量达到10 dB以上, 相对带宽达到91%, 为宽带低RCS反射屏设计提供了新的方法。

关键词: 新型阵列; 相位对消; 宽带; 低RCS

中图分类号: TN28

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)12-2925-07

DOI: 10.11999/JEIT181049

Design of A Novel Broadband Low RCS Array Based on Three Types of Reflective Cell Shared Aperture

ZHANG Guowen GAO Jun CAO Xiangyu YANG Huanhuan LI Sijia

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

Abstract: A novel wideband low RCS new super-surface array based on three reflective cell shared aperture is designed, which is composed of three kinds of Artificial Magnetic Conductor (AMC). Compared with the traditional AMC array, the new array uses one of AMC as phasor interference unit. A new phase cancellation relation is presented, the new phase cancellation relation is used to extend the traditional array phase cancellation band. Then, the parameters of the cell structure are further optimized to realize the reduction of RCS and the improvement of bandwidth. The physical sample is processed and tested. The results of simulation and field test show that: the backward reduction of RCS in the range of 5.2~13.9 GHz reaches more than 10 dB, and the relative bandwidth reaches 91%. It is shown that the new array can overcome the defect of the discontinuous operating band of the traditional array and has broadband low scattering characteristics.

Key words: New array; Phase cancellation; Broadband; Low RCS

1 引言

超材料是由人工设计的结构按照周期排列构成的新型电磁媒质^[1,2], 与天然结构相比, 具有多种特殊的电磁特性, 如完美吸波、同向反射、负折射、透射波带通或带阻等^[3-8], 这使其在电磁隐身领域具有广阔的应用前景。随着电子对抗技术的发展, 雷达隐身技术受到越来越多研究者的关注。而

超材料的提出为解决雷达隐身中的难题提供了一条新的技术途径。

雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)是表征物体隐身性能的一种度量^[9,10]。随着电磁隐身技术发展, 利用超材料缩减表面RCS的技术日趋成熟。1988年, Salisbury屏的提出实现了低后向散射, 但因为在低频工作时其厚度过大而难以在工程中应用。随后, 许多学者发现人工磁导体(Artificial Magnetic Conductor, AMC)具有同相反射特性, 用其代替理想电导体(Perfect Electric Conductor, PEC)表面可以克服1/4波长间隔限制^[11,12], 有效降低了材料厚度, 但是由于AMC同相反射的带宽较窄, 有效工作频带受到限制。2007年, Paquay等人^[13]首次提出将AMC运用于缩减目标RCS, 由于AMC

收稿日期: 2018-11-16; 改回日期: 2019-03-18; 网络出版: 2019-05-20

*通信作者: 高军 gijg9694@163.com

基金项目: 博士后创新人才支持计划(BX20180375), 国家自然科学基金(61471389, 61671464, 61701523)

Foundation Items: The Postdoctoral Innovative Talents Support Program of China(BX20180375), The National Natural Science Foundation of China (61471389, 61671464, 61701523)

与PEC的反射相位差近似为 180° ，将二者正交布阵并周期排列，使得垂直入射到其表面的电磁波反射后偏离法向方向，实现空域的RCS缩减。文献[14]采用“E”字形结构和十字箭头结构构成AMC阵列，在较宽频段范围内将反射相位差控制在 180° 左右，实现了在9.40~23.28 GHz范围内RCS缩减10 dB以上。利用多种AMC单元组合排列是实现宽带RCS缩减的有效方法^[15,16]，其中文献[15]将3种AMC单元排列成三角形子孔径进而组合为新型复合阵列，使得RCS缩减10 dB的频段覆盖X波段和大部分Ku波段。文献[17,18]以分形的形式设计了两种AMC单元，通过单元组阵分别实现了在5.4~14.2 GHz和6.5~19.0 GHz范围内RCS缩减10 dB以上。

本文提出一种基于3种AMC单元共享孔径的新型超表面阵列，以其中一种AMC作为相量干涉单元，通过优化单元结构参数使得每两种单元反射相位差满足特定的关系，按照新型相位抵消关系对3种单元进行合理布阵，仿真与实测结果表明：新型阵列在5.2~13.9 GHz范围内RCS缩减10 dB以上，相对工作带宽达到91%，验证了方法的可行性，为宽带低RCS阵列设计提供了新的思路。

2 新型阵列单元结构设计及相位相消原理

2.1 单元结构设计

本文提出的新型阵列单元结构俯视图如图1所示，介质上表面印刷有金属贴片，其中图1(a)、图1(b)上表面是尺寸不同方形贴片，介质材料为厚3 mm的聚四氟乙烯，介电常数2.2，损耗角正切0.001。介质层的下方为完整的金属底板，优化后的结构参数为： $P=8.0$ mm, $L1=3.0$ mm, $L2=7.1$ mm, $L3=7.5$ mm, $L4=3.0$ mm, $W=2.0$ mm。对图1的3种单元结构分别命名为AMC1, AMC2, AMC3。

2.2 相位相消原理

传统的低RCS超表面阵列模型由AMC和PEC组合构成，通常采用阵列天线的分析方法对其

工作原理加以研究^[19]。因为PEC理论反射相位恒为 180° ，利用AMC的同相反射特性，使得反射能量在法线方向抵消。但是由于AMC为谐振结构，同相反射区相对较窄，这使得有效工作带宽受到很大限制。在更为一般的情况下，阵列结构由两种反射相位不固定的AMC单元组成，即传统AMC反射屏称为情况I，并设两种单元结构为AMC1和AMC2。

设在电磁波照射下两种AMC结构产生幅度相同的电场，其等效辐射场可表示为

$$E_{\text{AMC}_1} = A_1 \cdot e^{j\varphi_1} \quad (1)$$

$$E_{\text{AMC}_2} = A_2 \cdot e^{j\varphi_2} \quad (2)$$

其中， A_1, A_2 为表面产生的电场幅度； φ_1, φ_2 分别为两种结构的反射相位，故等效的辐射总场可以进一步表示为

$$E = E_{\text{AMC}_1} \cdot F_1 + E_{\text{AMC}_2} \cdot F_2 \quad (3)$$

F_1 与 F_2 分别为两种结构的阵因子，各单元在等幅同相情况下的反射场表示为

$$E_0 = 4A \cdot e^{j\varphi_1} \quad (4)$$

若要阵列结构较单元同相情况下电磁波反射能量减小10 dB以上，即

$$|E|^2 / |E_0|^2 \leq -10 \text{ dB} \quad (5)$$

通过式(5)最终解得AMC₁与AMC₂反射相位应满足

$$143^\circ \leq |\varphi_1 - \varphi_2| \leq 217^\circ \quad (6)$$

为更加清晰表示两种单元反射相位差，图2采用单位圆极坐标系来对单元间的相位关系进行分析，通常将反射相位差取值范围定为 $[150^\circ, 210^\circ]$ 。

当一束平面波垂直照射反射型超表面时，其反射率可表示为

$$R = \left| \sum_i P_i \cdot (A_i \cdot e^{j\varphi_i}) \right|^2 \quad (7)$$

其中， P_i 表示超表面阵列中每种子孔径的面积占

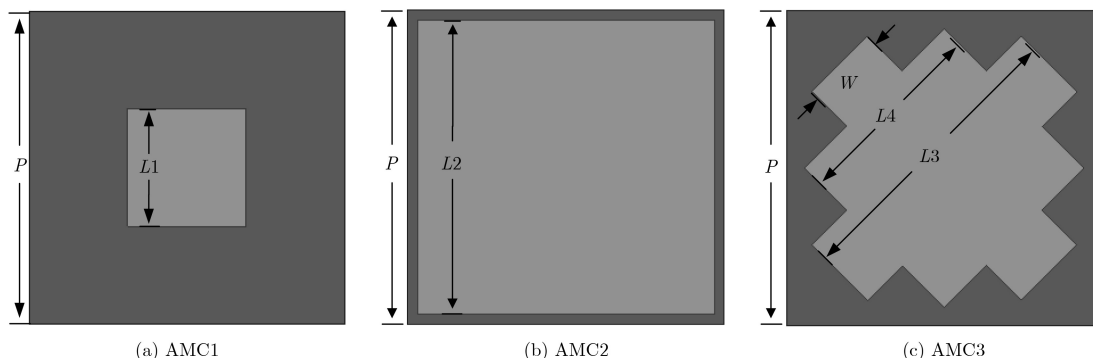


图1 阵列单元结构

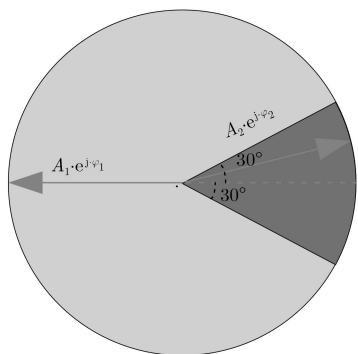


图2 情况I在极坐标下相位关系

比, A_i 表示子孔径的反射幅度, φ_i 为子孔径的反射相位。对于情况I由两种AMC单元组合成的阵列满足

$$\left. \begin{aligned} P_1 = P_2 = 1/2, A_1 = A_2 = 1 \\ 150^\circ \leq |\varphi_1 - \varphi_2| \leq 210^\circ \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7), 得到两种AMC单元组合成的阵列在该条件下的反射率 $R \leq 0.08$, 但这一结果是建立在对单元反射特性理想计算的基础上, 对于实际的超表面阵列, 此时各个子孔径表面的相位梯度相对无限单元仿真时情况已经发生一定程度的改变, 这是由单元仿真与阵列仿真的差异造成的, 最终导致阵列的反射率不能始终维持在一个低水平值内。换言之, 当其中一种子孔径的相位特性确定, 另一种子孔径的相位变化范围只有 $\pm 30^\circ$, 其相位相消条件自由度较低。因此, 本文提出由3种AMC单元共享孔径的新型阵列, 称为情况II, 各单元之间应满足的条件如式(9)和式(10)

$$P_1 = P_2 = P_3 = 1/3, A_1 = A_2 = A_3 = 1 \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} |\varphi_1 - \varphi_2| \geq 180^\circ \\ |\varphi_1 - \varphi_3| \leq 180^\circ \\ |\varphi_2 - \varphi_3| \leq 180^\circ \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

即在传统阵列中引入一种新的AMC反射单元, 在极坐标下的新型相位关系如图3所示。将3种子孔径称为E1, E2, E3, 这样只需子孔径E3的相量

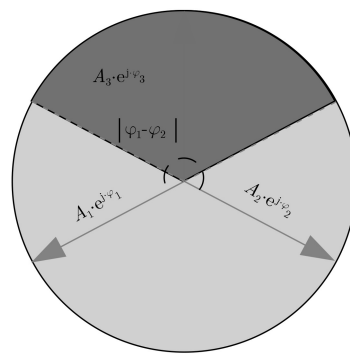


图3 情况II在极坐标下相位关系

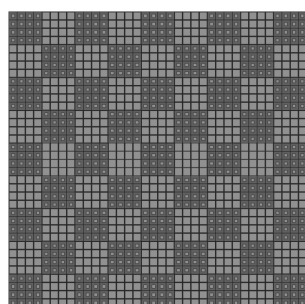
位于E1和E2反射延长线包围的阴影区域内, E1与E2的相量和就会因E3的引入而被有效干涉相消, 把式(9)和式(10)代入式(7), 可得最终由3种AMC单元共享孔径构成的新型阵列的反射率 $R \leq 0.11$, 相比于情况I的相位约束条件更为宽松, 这一点在阵列仿真中实现超表面阵列的宽带RCS缩减是非常有利的。

3 新型阵列设计及仿真分析

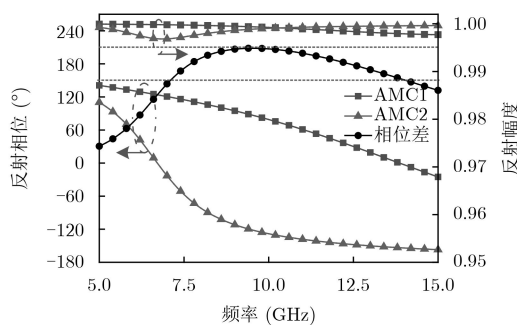
3.1 新型阵列设计

取图1(a)、图1(b)中的AMC1与AMC2作为情况I的两种结构单元, 为维持单元的周期性, 将 4×4 个单元组成一个阵列子孔径, 将两种子孔径正交排布形成 9×9 的传统超表面阵列, 如图4(a)所示。对单元结构反射特性进行仿真, 由图4(b)可知在7.2~13.8 GHz频带内两种单元的相位差可保持在 $[150^\circ, 210^\circ]$ 范围内。

取图1中AMC1, AMC2和AMC3作为情况II的3种结构单元, 为满足式(10)中新的反射相位条件并使得RCS缩减效果更好, 本文对AMC1和AMC2进行优化改进, 让相位差 $\varphi_1 - \varphi_2$ 尽可能接近 240° , 在新型阵列中本文采取固定 $L_1=3.0$ mm不变, 调节 L_2 的取值, 经过优化将图1(a)中AMC2单元的金属贴片边长更新为 $L_2=7.5$ mm, 图5(a)给出了3种AMC单元的反射特性曲线。



(a) 传统阵列



(b) 反射特性

图4 情况I阵列及其单元反射特性曲线

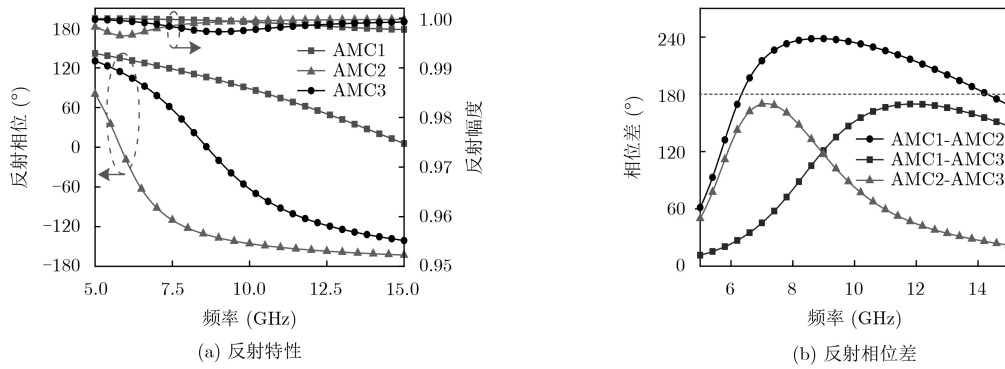


图5 情况II中3种AMC单元特性

由图5(a)可以看出，式(9)中的幅度条件得以满足。为更加清晰表示3种单元间的相位关系，图5(b)给出单元的相位差曲线，由图5(b)可知在6.2~14.3 GHz频段范围内相位关系得以满足。相比于图4(b)，此时的相位对消频带明显增加。

为满足式(9)中的各子孔径面积条件比，比拟传统型反射屏的布阵方式，将3种单元以4×4组成

3种子孔径E1, E2和E3，再将子孔径交叉排列形成一个3×3的超表面晶格，此时这种超表面晶格具有3种排列形式，如图6(a)所示，最后将3种晶格交叉排列形成图6(b)的新型阵列。此时 $P_1 = P_2 = P_3 = 1/3$ ，子孔径E3被有效植入到新型阵列中，将对另外两种单元的相量和产生明显的干涉相消。

在电磁波垂直入射时，仿真得到传统阵列与新

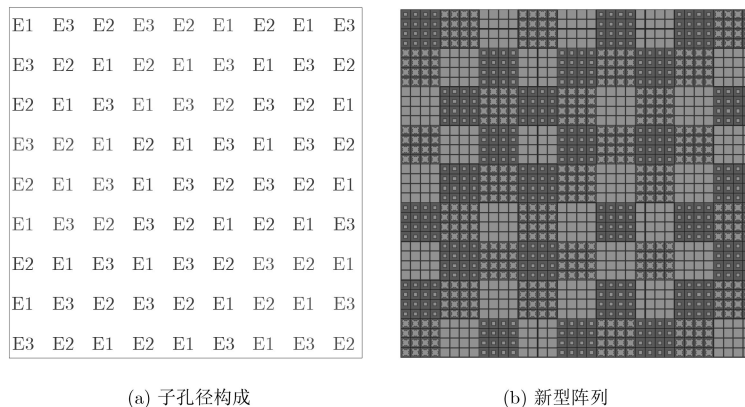


图6 新型阵列及其子孔径构成

型阵列相对于金属表面的单站RCS缩减量如图7所示，由图7可知，新型阵列在平面波照射下的RCS缩减效果对极化不敏感，在整个观测频段(除个别频点)缩减明显优于传统阵列。在5.2~13.9 GHz范围内，新型阵列对两种极化波的RCS缩减量均可保

持在10 dB以上，其相对带宽达到91%，表明新型阵列克服了传统阵列工作频带不连续的缺陷，具有宽带低散射特性。

3.2 仿真分析

为进一步研究新型阵列散射场的缩减机理，图8给出了不同频点下截取阵列部分的电场分布。

可以看出在 $f=6$ GHz时，子孔径E2的电磁谐振最强，即E2对电磁波同相反射，子孔径E3的谐振次之、E1的最弱，这说明3种子孔径表面形成一定的相位梯度，而这一梯度能够满足式(10)中的相位对消条件，从而使得反射能量在法向方向干涉相消；当 $f=8$ GHz时，E3表面电场最强，E2次之，E1最弱，此时仍可以形成有效的相位梯度使得RCS缩减；当 $f=13$ GHz时，3种子孔径的表面电场强度相当，但此时阵列相对金属板仍有10 dB的缩减，表

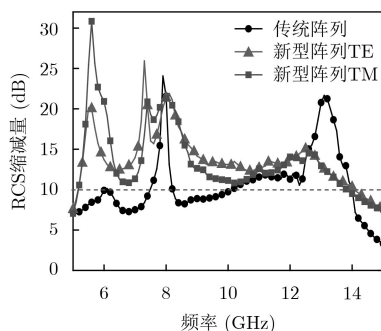


图7 垂直入射时单站RCS缩减情况对比

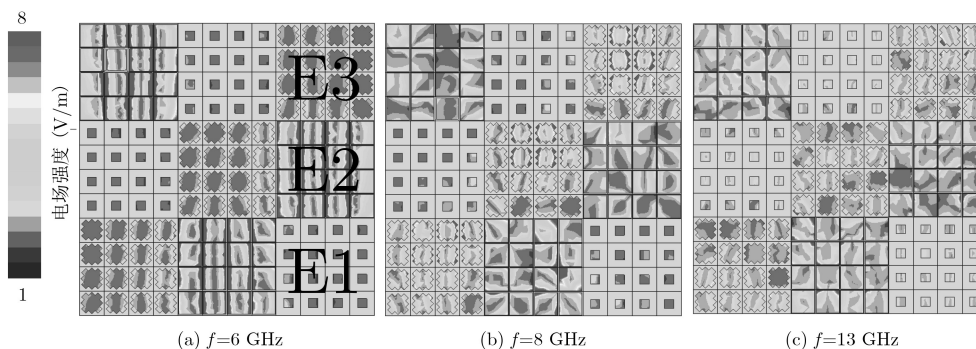


图8 截取阵列部分的电场分布

明子孔径 E_1 , E_2 和 E_3 所携带相量的模值相近但方向相反, 从而使得阵列的RCS得到有效减缩。

图9从空域反映出上述中的两个频点下金属板、传统阵列和新型阵列的散射特性, 可以看出相对于理想金属板, 两种阵列均将反射波束打散到空间各

个方向, 但新型阵列的反射能量分布更均匀, 在法线方向出现散射场的零陷, 且随着频率增加, 散射波束中间增多, 能量在空间分布也更均衡, 这表明新型阵列不仅具有宽频域的低RCS特性, 还具有宽空域的低散射特性。

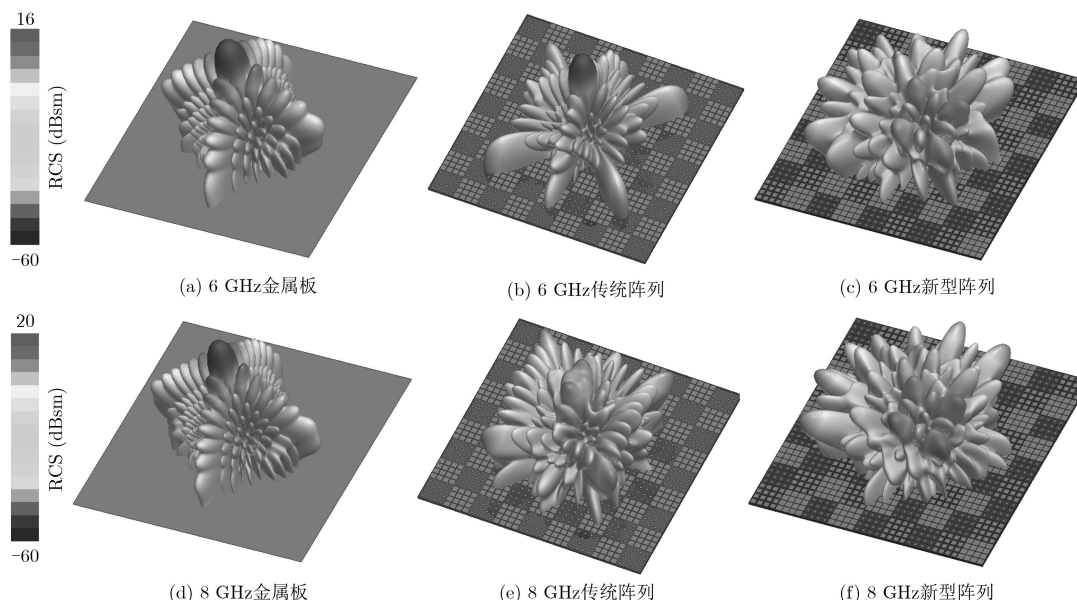


图9 不同频点下散射图

图10给出了斜入射情况下新型阵列的散射性能, 可以看出当电磁波以TE模式入射时, 阵列的双站RCS缩减量随着角度增大而减小, 当入射角 $=15^\circ$ 时, 阵列在5.2~13.6 GHz范围内可以获得6 dB以上的RCS缩减, 其相对带宽达到89.4%; 当电磁波以TM极化模式入射时, 阵列的双站RCS缩减效果与TE极化模式下相似。总体表明, 在斜入射情况下阵列的RCS缩减效果良好。

4 样品加工测试

将图6(b)所示的新型阵列, 采用印刷电路板技术加工实物并进行测试。在微波暗室中, 利用空间波法^[20]对样品分别进行测试。图11给出了阵列样品

实物及实测配置, 利用两个双脊喇叭天线收发电磁波, 两个喇叭天线分别连接到AgilentN5230C矢量网络分析仪的两个端口, 摆放时保证喇叭口对准样品几何中心, 分别对金属板和新型阵列进行测试, 得到RCS缩减曲线。

样品实测的RCS缩减曲线如图12所示, 可以看出, 在5.2~13.9 GHz范围内, TM模式下除了个别频点外, RCS缩减量均在10 dB以上, 最大缩减量为31.4 dB, 相对带宽达到了91%; 在TE模式下, 存在部分频点RCS缩减量略小于10 dB, 其余频段RCS缩减量均在10 dB以上, 最大缩减量为30.6 dB, 总体表明实测与仿真结果接近。通过分析, 认为频率与幅值差异是由于实物加工误差和摆放位置偏差造

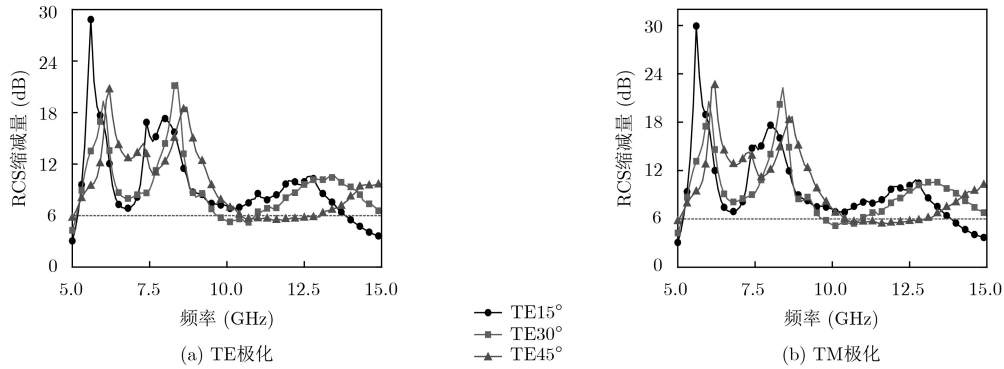


图10 斜入射时双站RCS缩减曲线

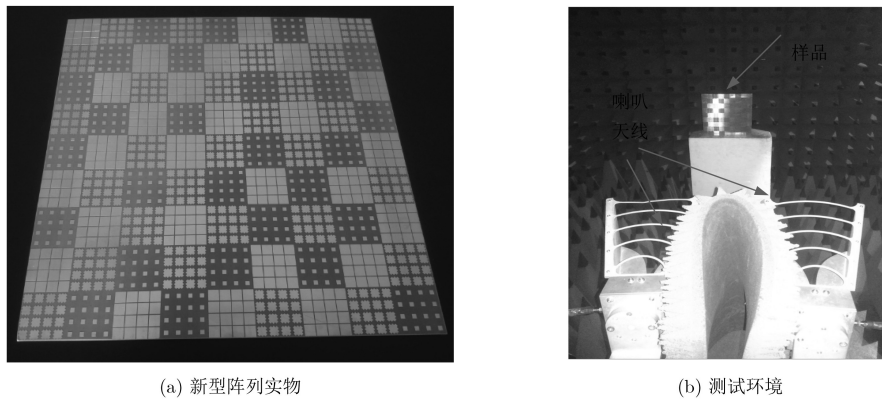


图11 实物制作及测试

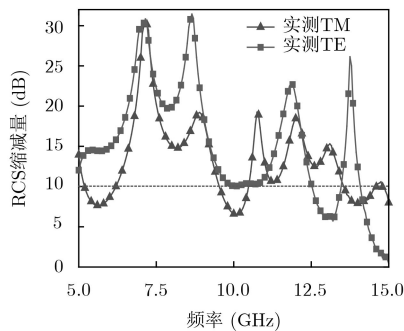


图12 实测RCS缩减曲线

成的, 通过多次测量对比, 测试结果与仿真结果较为吻合。

5 结论

本文基于新型相位对消关系设计了一种新型阵列, 该阵列由2种AMC单元结构共享孔径而成, 通过对子孔径交错布阵, 使得阵列单元满足相位对消条件, 有效降低了后向RCS, 阵列虽然不具有对称结构, 但对入射波极化不敏感。分析并推导了新型相位差与反射率的关系, 结合阵列表面电流分布解释了缩减机理。加工样品实物并进行测试, 通过多次测量比较, 得到测试与仿真结果较为符合, 验证了该设计方法的可行性, 为宽带低RCS阵列设计提供了新的思路。

参考文献

- [1] PENDRY J B, SCHURIG D, and SMITH D R. Controlling electromagnetic fields[J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1780–1782. doi: [10.1126/science.1125907](https://doi.org/10.1126/science.1125907).
- [2] LING Baoqing, ZHAO Shanghong, WEI Wei, *et al.* Design of a tunable frequency selective surface absorber as a loaded receiving antenna array[J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(2): 024201. doi: [10.1088/1674-1056/23/2/024201](https://doi.org/10.1088/1674-1056/23/2/024201).
- [3] ESMAELI S H and SEDIGHY S H. Wideband radar cross-section reduction by AMC[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(1): 70–71. doi: [10.1049/el.2015.3515](https://doi.org/10.1049/el.2015.3515).
- [4] ZHAO Yi, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Broadband diffusion metasurface based on a single anisotropic element and optimized by the Simulated Annealing algorithm[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23896. doi: [10.1038/srep23896](https://doi.org/10.1038/srep23896).
- [5] LI Sijia, GAO Jun, CAO Xiangyu, *et al.* Multiband and broadband polarization-insensitive perfect absorber devices based on a tunable and thin double split-ring metamaterial[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3523–3533. doi: [10.1364/OE.23.003523](https://doi.org/10.1364/OE.23.003523).
- [6] KANG Xiaole, SU Jianxun, ZHANG Hui, *et al.* Ultra-wideband RCS reduction of microstrip antenna array by optimised multi-element metasurface[J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(8): 520–522. doi: [10.1049/el.2017.0260](https://doi.org/10.1049/el.2017.0260).
- [7] HYUNG S J, DETOMA A S, BRENDER J R, *et al.*

- Insights into anti-amyloidogenic properties of the green tea extract (-)-epigallocatechin-3-gallate toward metal-associated amyloid- β species[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(10): 3743–3748. doi: [10.1073/pnas.1220326110](https://doi.org/10.1073/pnas.1220326110).
- [8] YEPES C, CAVALLO D, GANDINI E, *et al.* Angularly stable frequency selective surface combined with a wide-scan phased array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(2): 1046–1051. doi: [10.1109/TAP.2017.2778768](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2778768).
- [9] LIU Ying, HAO Yuwen, LI Kun, *et al.* Wideband and polarization-independent radar cross section reduction using holographic metasurface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 1028–1031. doi: [10.1109/LAWP.2015.2490241](https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2490241).
- [10] LIU Ying, LI Kun, JIA Yongtao, *et al.* Wideband RCS reduction of a slot array antenna using polarization conversion metasurfaces[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(1): 326–331. doi: [10.1109/TAP.2015.2497352](https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2497352).
- [11] SIMMS S and FUSCO V. Tunable thin radar absorber using artificial magnetic ground plane with variable backplane[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(21): 1197–1198. doi: [10.1049/el:20061989](https://doi.org/10.1049/el:20061989).
- [12] COSTA F, MONORCHIO A, and MANARA G. Analysis and design of ultra thin electromagnetic absorbers comprising resistively loaded high impedance surfaces[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(5): 1551–1558. doi: [10.1109/TAP.2010.2044329](https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2044329).
- [13] 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. doi: [10.1109/TAP.2007.910306](https://doi.org/10.1109/TAP.2007.910306).
- [14] ESMAELI S H and SEDIGHY S H. SLL reduction of slot array antenna by artificial magnetic conductor side walls[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(18): 1513–1514. doi: [10.1049/el.2016.2430](https://doi.org/10.1049/el.2016.2430).
- [15] ZHENG Yuejun, GAO Jun, XU Liming, *et al.* Ultrawideband and polarization-independent radar-cross-sectional reduction with composite artificial magnetic conductor surface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 1651–1654. doi: [10.1109/LAWP.2017.2660878](https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2660878).
- [16] MODI A Y, BALANIS C A, BIRTCHER C R, *et al.* Novel design of ultrabroadband radar cross section reduction surfaces using artificial magnetic conductors[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(10): 5406–5417.
- [17] LI Youquan, ZHANG Hui, FU Yunqi, *et al.* RCS reduction of ridged waveguide slot antenna array using EBG radar absorbing material[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2008, 7: 473–476. doi: [10.1109/LAWP.2008.2001548](https://doi.org/10.1109/LAWP.2008.2001548).
- [18] XUE Jingjing, JIANG Wen, and GONG Shuxi. Wideband RCS reduction of slot-coupled patch antenna by AMC structure[J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(22): 1454–1456. doi: [10.1049/el.2017.2587](https://doi.org/10.1049/el.2017.2587).
- [19] LI Sijia, GAO Jun, CAO Xiangyu, *et al.* Polarization-insensitive and thin stereo -metamaterial with broadband angular absorption for the oblique incidence[J]. *Applied Physics A*, 2015, 119(1): 371–378. doi: [10.117/s00339-014-8978-y](https://doi.org/10.117/s00339-014-8978-y).
- [20] 杨欢欢, 杨帆, 许慎恒, 等. Ku波段编码式电控超薄周期单元设计与验证[J]. *物理学报*, 2016, 65(5): 054102.
- YANG Huanhuan, YANG Fan, XU Shenheng, *et al.* Design and verification of an electronically controllable ultrathin coding periodic element in Ku band[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(5): 054102.
- 张国雯: 男, 1992年生, 博士生, 研究方向为天线设计、人工电磁材料设计等。
- 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。
- 杨欢欢: 男, 1989年生, 讲师, 研究方向为天线与电磁兼容、电磁超材料、计算电磁学等。
- 李思佳: 男, 1987年生, 副教授, 硕士生导师。研究方向为磁电偶极子天线、超宽带吸波体等。