

宽带低RCS超表面天线阵设计

刘涛 曹祥玉* 高军 兰俊祥 丛丽丽

(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

摘要: 该文利用电磁超表面与微带天线的结构高度相似性, 设计了2种辐射特性几乎一致且具有反射相位差异的超表面天线, 通过将2种天线单元进行棋盘布阵, 在 x 极化波和 y 极化波照射下分别利用相位相消及匹配负载吸收实现了天线阵带内散射能量的抑制。实测与仿真结果表明: 该超表面天线工作于6.0~8.5 GHz。 x 极化波垂直入射时天线单站RCS减缩6 dB带宽为6.2~10.5 GHz, 最大减缩量达21.07 dB。 y 极化波垂直入射时天线的带内RCS减缩依然能达到3 dB以上。且实测与仿真结果吻合良好。该设计方法为实现天线阵带内RCS减缩提供了新的设计思路。

关键词: 阵列天线; 超表面; 雷达散射截面; 宽频

中图分类号: TN820

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)09-2095-08

DOI: 10.11999/JEIT180922

Design of Wideband Metasurface Antenna Array with Low Scattering Characteristics

LIU Tao CAO Xiangyu GAO Jun LAN Junxiang CONG Lili

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

Abstract: A broadband metasurface antenna array with wideband low Radar Cross Section (RCS) is proposed. Two kind metasurface antennas with nearly the same radiation performance are designed and fabricated in a chessboard configuration. For x -polarized incidence, the reflected energy from the two elements is dissipated based on destructive phase difference. For y -polarized incidence, the incident energy is absorbed by matching load. By this means, inherent wideband low RCS is achieved for both polarizations without redundant structures. The proposed antenna array is fabricated and measured. Simulated and measured results show that the working frequency band is 6.0~8.5 GHz. Meanwhile under x polarization the antenna monostatic RCS is reduced significantly 6 dB RCS reduction is achieved over the range of 6.2~10.5 GHz and the peak reduction is up to 21.07 dB. Under y polarization the antenna monostatic RCS is reduced over 3 dB RCS reduction in bandwidth. Both measured and simulated results verify the proposed antenna array is characterized with wideband low-RCS without degrading the radiation performance.

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

1 引言

随着雷达与防空技术越来越强大, 飞机的隐身

技术成为了军事作战领域重要的研究对象。天线由于需要向外辐射电磁波, 所以天线的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)对其所搭载的隐身设备的总雷达散射截面贡献很大^[1]。因此, 降低天线的RCS已经迫在眉睫, 对于如何降低天线的RCS成为近年来的研究热门^[2-4]。传统方法是通过外形设计, 涂覆吸波材料等手段, 这些方式大多只能实现天线带外的RCS减缩, 且缩减带内RCS常常是以牺牲天线的辐射性能为代价^[5-7]。微带天线具有低剖面, 低副瓣, 易共形等优点, 容易实现双频段^[8]、双极化^[9,10]等功能, 常被应用于各种飞行器中。近些年来, 超材料凭借着其奇异的电磁特性, 受到越来越多学者的关注, 同时随着它的出现和发

收稿日期: 2018-09-27; 改回日期: 2019-02-03; 网络出版: 2019-03-14

*通信作者: 曹祥玉 gigi9694@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61271100, 61471389, 61501494), 陕西省自然科学基金(2017JM6025), 博士后创新人才支持计划(BX20180375), 陕西省高校科协青年人才托举计划资助项目(20170107)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61271100, 61471389, 61501494), The Natural Science Foundational of Shaanxi Province (2017JM6025), The Postdoctoral Innovative Talents Support Program of China (BX20180375), The Young Talent fund of University Association for Science and Technology in Shaanxi Province (20170107)

展也给减缩天线RCS提供了新的方法和思路。且在微带天线与电磁超表面一体化设计方面已有应用^[11]。对有效减缩微带天线带内的RCS具有广阔的实用价值。

文献[12]将各项异性的人工磁导体视为2种人工磁导体(Artificial Magnetic Conductor, AMC)单元, 排布在天线周围, 实现了天线的RCS减缩, 同时提高了天线增益。文献[13]将2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, 加载到天线周围, 同时实现了带内带外的RCS减缩。文献[14]通过加载人工磁导体材料, 并与天线共形, 有效地减缩了天线带内外的RCS。文献[15]通过在接地板上开槽, 有效减缩了其带内的RCS。尽管现有文献实现了单个天线RCS的有效减缩。但对于天线阵而言, 有限的阵元间距限制天线阵的宽带RCS减缩。

本文利用电磁超表面与微带贴片天线结构的高度相似性, 将天线单元既作为辐射单元又作为散射单元, 设计了2种辐射特性一致的超表面天线, 并将两种天线单元进行棋盘布阵。2种超表面天线单元均采用L型耦合馈电, 相比于传统同轴馈电, 有

效拓宽了天线的工作带宽, 相对带宽达到31%, 同时在x极化波和y极化波照射下分别利用相位相消及匹配负载吸收实现了天线阵带内散射能量的抑制。实测与仿真结果表明: 该天线阵列在保持天线单元宽带辐射性能的同时实现了带内RCS的有效减缩, 最大减缩量达到31 dB。

2 单元设计与分析

2.1 单元结构尺寸

天线单元结构和参数如图1和表1所示, 天线单元大小 $a = 25 \text{ mm}$ (0.49λ), 天线由上下2层介质板和 $h = 3.5 \text{ mm}$ 的空气层构成。介质板采用介电常数 $\epsilon_r = 2.65$, 损耗角正切的聚四氟乙烯玻璃布板, 厚度 $t = 1.0 \text{ mm}$ 。其中上层介质的下表面刻蚀有矩形小贴片与同轴线相连接组成L型馈线实现对上层介质的上表面贴片耦合馈电, 同轴线为了便于加工选择穿透矩形小贴片至上层介质的上表面, 仿真后发现突出部分同轴线对天线辐射几乎没有影响。其中矩形小贴片的大小为: $l_1 = 1.2 \text{ mm}$, $b_1 = 0.7 \text{ mm}$ 。为了简化描述, 该天线单元命名为E1。

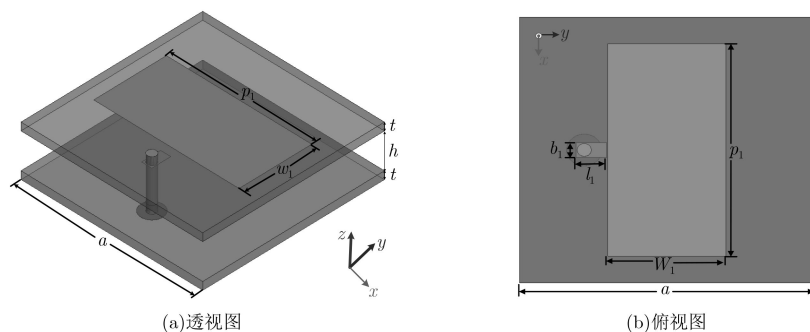


图1 天线单元E1

表1 天线单元E1

参数	a	w_1	l_1	h	t	p_1	b_1
尺寸(mm)	25.0	10.0	1.2	3.5	1.0	20.0	0.7

在商用软件HFSS中建模分析天线单元特性, 根据天线所受激励的不同, 采用不同的边界仿真。首先在辐射边界和集总端口(端口匹配为 50Ω)激励下, 分析了超表面天线的辐射特性, 如图2所示。图2(a)分析了L型馈线的边长 l_1 对天线辐射性能影响进行了分析, L型馈线的边长 l_1 对天线的谐振深度影响较大, 对天线的谐振频点影响较小。图2(b)和图2(c)为反射系数随贴片尺寸变化的趋势, 矩形贴片边长 w_1 的变化(沿y轴长度)对天线的谐振频率影响较大。随着 w_1 增加, 整个天线工作频带向低频移动。而由于沿x轴方向的电流很小, 矩形贴片

边长 p_1 的变化(沿x轴长度)对天线的谐振频率影响较小。

仿真了在主从边界, floquet端口激励下, 将天线单元E1作为电磁超表面时对应的反射特性。由图3(a)可知, 加载匹配负载后, l_1 对y极化下电磁超表面的反射幅度有很大的影响, 但对x极化下电磁超表面的反射幅度没有影响, 依然表现为全反射。因此天线的馈电部分仅影响y极化波下的吸波特性和。这说明了单元在y极化下, 加载匹配负载后, 主要是被馈电端口的 50Ω 阻抗匹配吸收。由图3(b)和图3(c)可知, 加载匹配负载后, w_1 对x极化波的反射相位影响较小, 但对y极化波的反射相位影响较大。由图3(d)和图3(e)可知, 加载匹配负载后, p_1 对y极化波的反射相位影响较小, 但对x极化波的反射相位影响较大。为进一步分析 p_1 对x极化波的

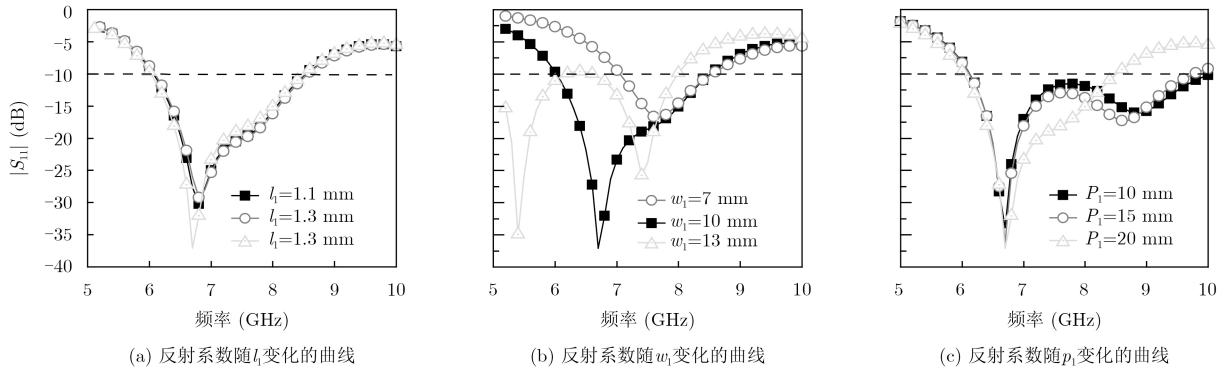


图2 金属贴片尺寸变化对E1反射系数的影响

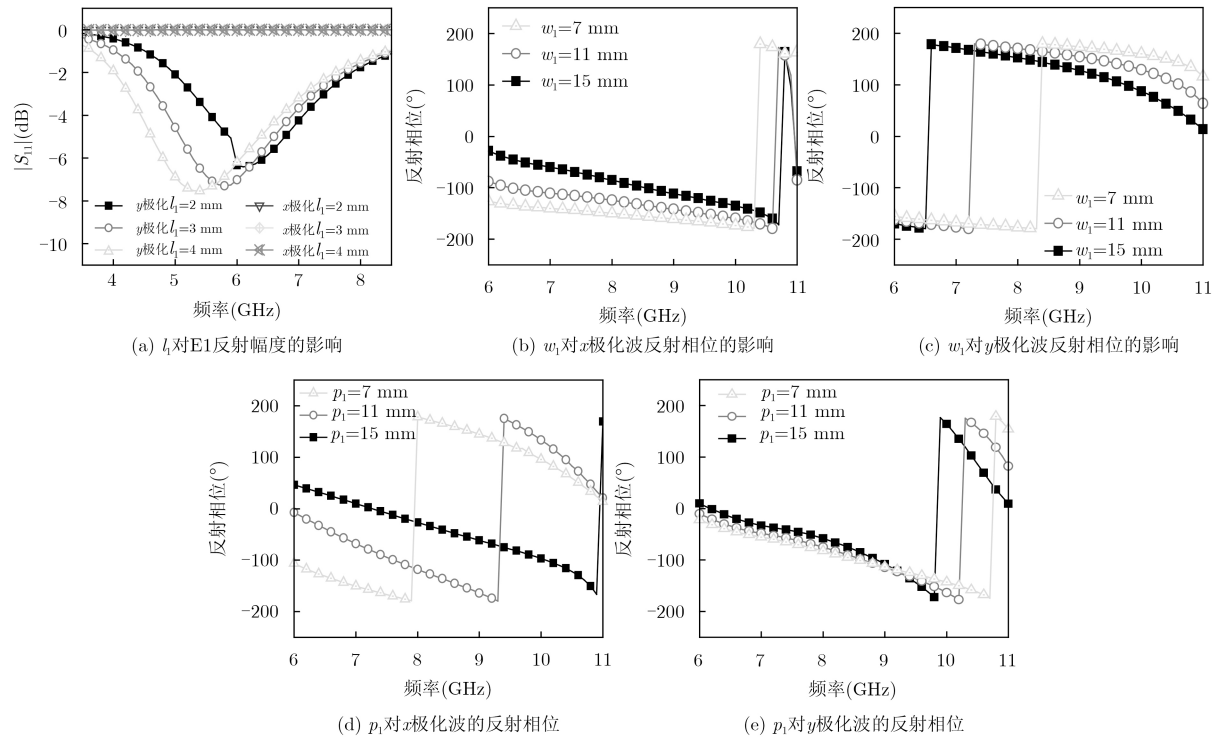


图3 金属贴片尺寸变化对E1散射特性的影响

反射特性的影响，将 p_1 减小，如图4所示， x 极化波激励起的表面电流路径变短，反射零频点向高频移动。

根据以上分析，优化设计了E1使工作在5.9~8.5 GHz。天线在加载匹配负载时，在 y 极化下，天线带内具有较高的吸波率，在 x 极化下，类似于全反射，天线在 x 极化下的强反射需要得到进一步抑制。为实现E1在 x 极化下反射率的下降，基于E1设计新天线将其命名为E2，如图5所示，基本参数如表2所示。应尽可能保证边长 $w_1=w_2$ ，可保证天线的谐振频率几乎不变。尽量对 p_2 进行长度的调整，使E2在被 x 极化波照射时，电流路径减小，零点反射相位向低频移动，从而与原始单元E1形成相位差，再通过棋盘布阵设计天线阵列，可实现 x 极化下基于相位相消的低RCS设计。最后通过优化边长 l_2 实现E2在谐振频点具有良好的阻抗匹配。

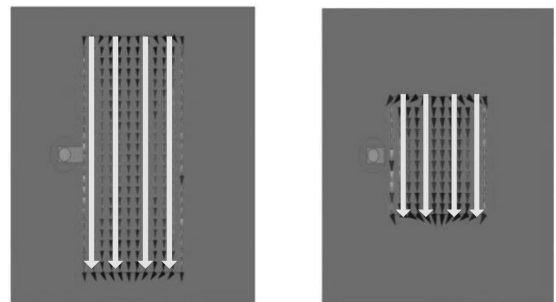


图4 x 极化波激励起的表面电流

从辐射角度分析2种单元，图6为天线的 $|S_{11}|$ 和天线的增益。E2的工作频段为6~10 GHz，谐振带宽(50%)相对于E1(31%)扩宽。取E1和E2单元天线各自工作频段的交集作为天线阵的工作频段(6~8.5 GHz)，保证了2种天线在工作频段内辐射性能

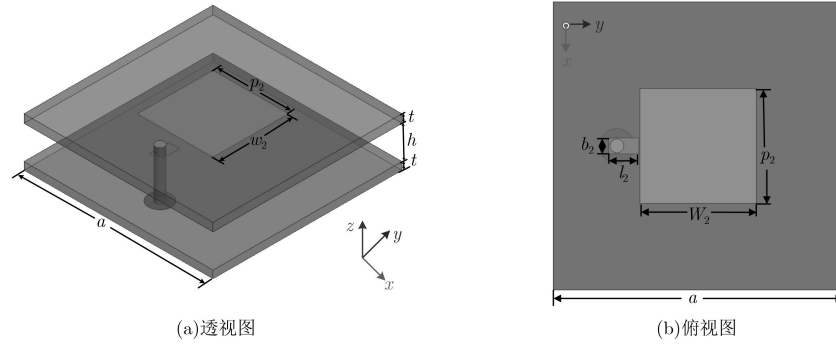


图5 天线单元E2

表2 天线单元E2

参数	a	w_2	l_2	h	t	p_2	b_2
尺寸 (mm)	25.0	10.0	1.2	3.5	1.0	10.0	0.7

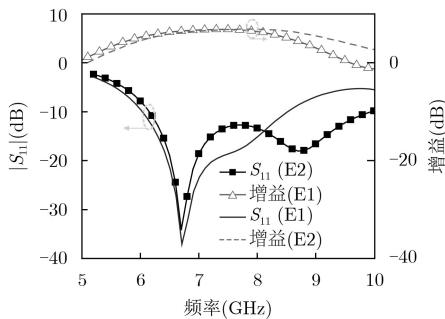


图6 E1和E2反射系数及增益

上存在较好的一致性。图7为天线工作于6.7 GHz和8 GHz的方向图，两者的方向图近乎完全重合。

图8为2种天线作为电磁超表面时，在y极化下的反射特性，可知在y极化下，均存在较高的吸波率，且反射相位不存在有效相位差带宽。由图9所示可知在x极化下，两者几乎都是全反射，在4.5~9 GHz存在 $180^\circ \pm 30^\circ$ 相位差。满足相位相消的条件，实现RCS减缩。

3 低RCS天线阵列的设计与分析

参考2种天线单元组合成天线阵与单一天线组合成的天线阵的辐射性能差异，将16个单一的E1单元组成的天线阵称为C1，再将16个单一的

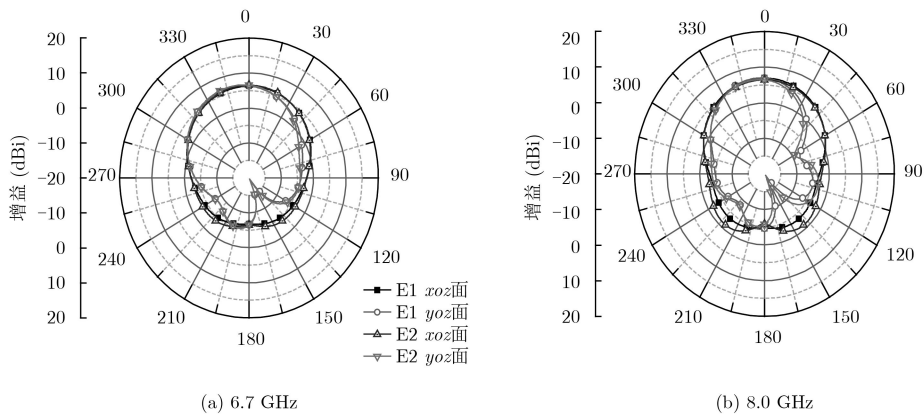


图7 E1和E2单元辐射方向图

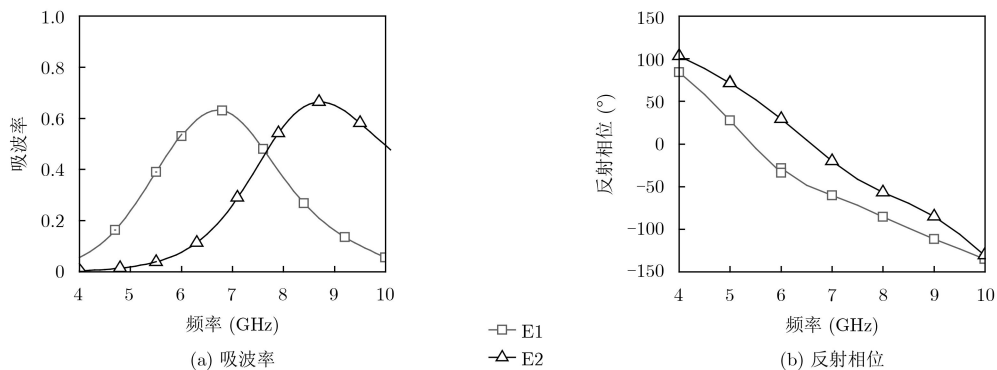


图8 y极化下的反射特性

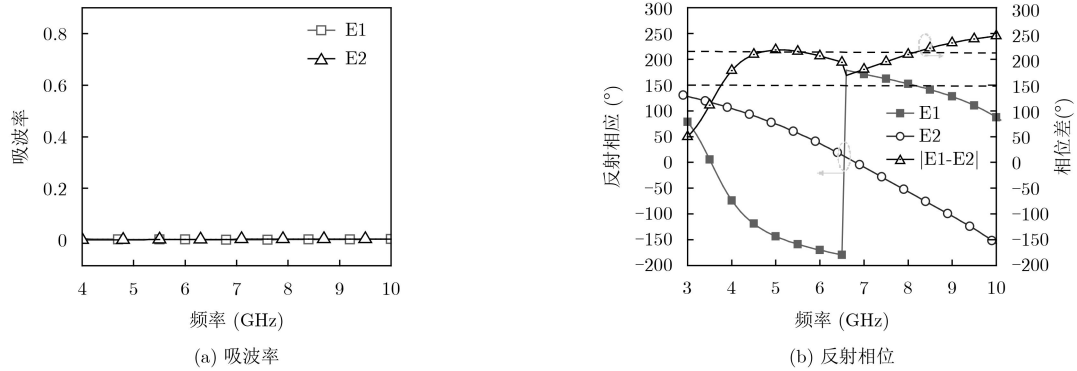


图 9 x 极化下的反射特性

E2单元组成的天线阵为C2。为了表现出电磁超表面的周期特性，所以每种天线的单元块都是 2×2 组合，再通过棋盘布阵的形式设计成 4×4 的天线阵，该天线阵为C3。天线阵的编码顺序采用单元块及单元块的单元两级逆时针分块编码，3种天线阵的具体编码如图10所示。由于3种天线阵的各自对角线上的天线单元类型相同，所以相邻单元块上且类型不同的单元作为对比，即取 $E11_3, E21_3, E31_3$ ，来比较阵元的反射系数。图11(a)为天线的 $|S_{11}|$ ，3种阵列天线的 $|S_{11}|$ 曲线几乎重合，均工作于 $6.0 \sim 8.5$ GHz。图11(b)为3种天线阵在6.7 GHz处的方向图，C1, C2, C3方向图的主极化几乎一致，且都实现了

对交叉极化波很好的抑制。图11(c)为3种天线阵的增益曲线。由以上分析可知，C3具有与C1和C2几乎相同的辐射特性，实现了2种超表面天线布阵后相比与单一天线阵依然能保持良好的辐射特性的猜想。

图12为3种阵列作为电磁超表面反射阵的单站RCS，并与相同大小的金属板的RCS比较，为了简化描述，金属板用M1代替。在 x 极化波垂直照射下，C1, C2与M1相比有一定的RCS减缩。

但C3相比于C1, C2, M1均在 $4.2 \sim 10.5$ GHz实现了6 dB以上的RCS减缩，相对带宽达86%。在 y 极化波垂直照射下，C3的单站RCS曲线介于C1, C2的单站RCS曲线之间。这很好地解释了C3对于

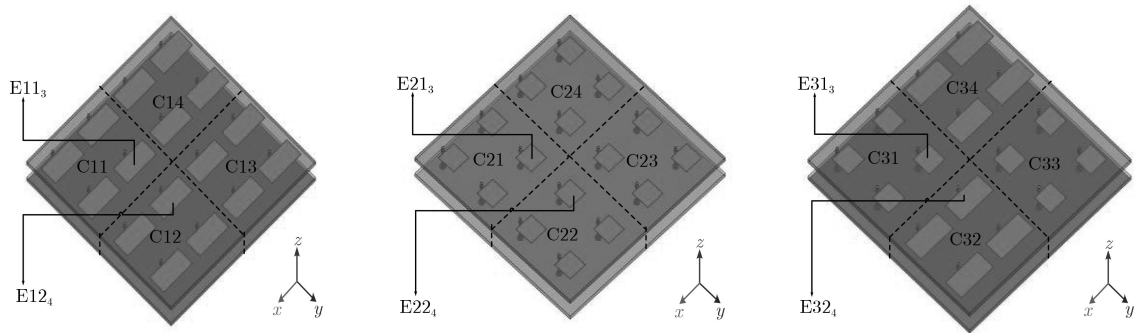


图 10 天线阵列

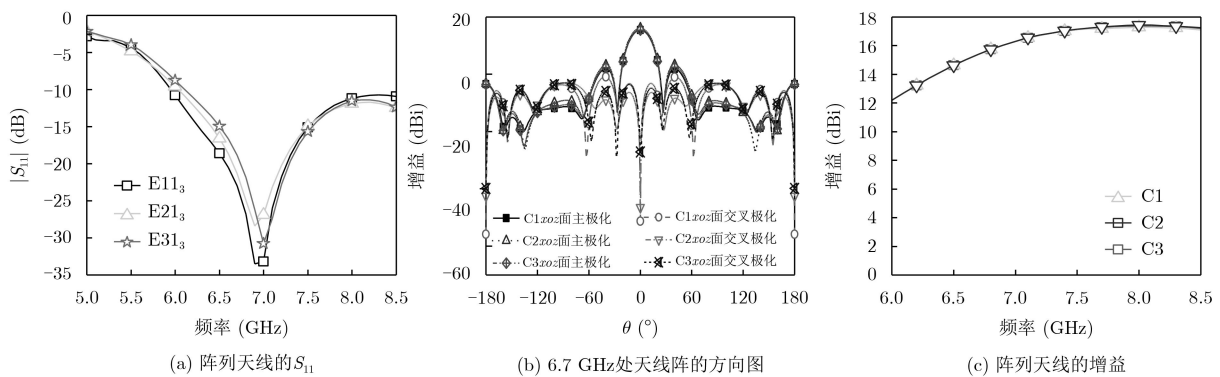


图 11 天线辐射特性

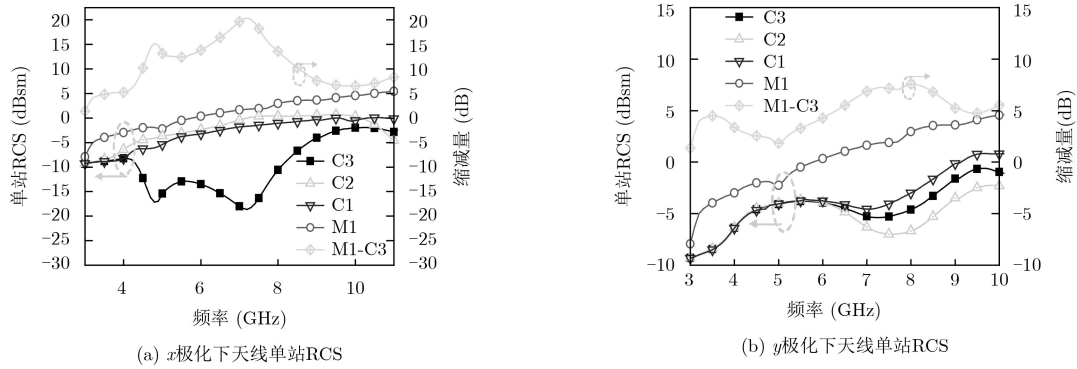


图 12 天线阵列散射特性

y 极化方向电磁波反射率的降低是通过 $50\ \Omega$ 的负载阻抗对电磁波的吸收来实现的。图13为C1, C2, C3和M1在2个极化下,各自RCS减缩峰值所对应频点6.7 GHz处的3维散射方向图。由图13(a)可知,由于 $50\ \Omega$ 阻抗匹配负载的存在,在 y 极化电磁波照射下C1, C2, C3的最大反射波峰值要小于

M1的最大反射波峰值。由图13(b)可知,在 x 极化电磁波照射下,最大反射波峰值方向已经发生了改变, C1, C2为天线阵的法向方向,而C3的反射波被分散到4个对角线区域,而在天线阵的法向方向处的反射能量非常小,这说明C3对 x 极化电磁波的低RCS特性是利用了相位相消原理。

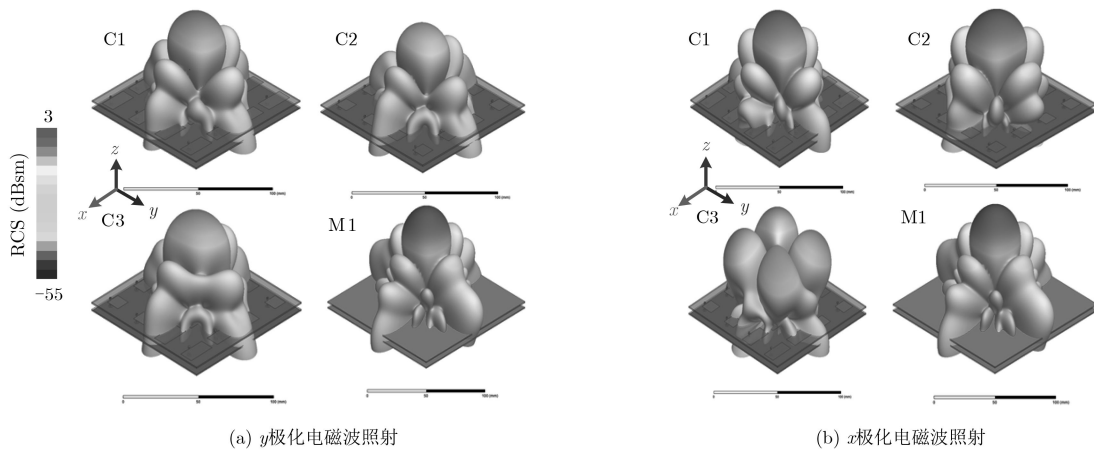


图 13 电磁波散射方向图

4 加工实测

4.1 超表面天线散射性能测量

图14为加工的天线阵实物和功分器,并在微波

暗室中利用Agilent N5230C矢量网络分析仪对天线 $|S_{11}|$ 曲线进行了测试;用2个宽带标准喇叭天线采用自由空间法测量天线的散射性能,如图15所示。天线阵实物测试了3.0~11.0 GHz频段天线的反射系数曲线。

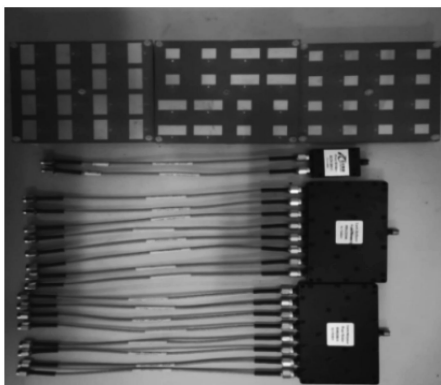


图 14 天线加工图及功分器

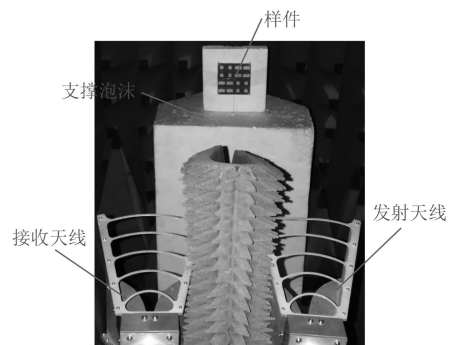


图 15 天线单站RCS测试图

图16(a)为天线阵在垂直入射时 x 极化下的单站RCS。C3相比与C1, C2, M1均具有明显的RCS减缩, 图16(b)为C3与M1的相对RCS缩减量的实测数据与仿真数据的对比。C3在 x 极化下出现了2个减缩峰值。在7.9 GHz处, RCS缩减量最大为21.07 dB。图17(a)为天线阵在垂直入射时 y 极化下的单站RCS。C3, C1, C2, 相比M1在频带内均具有较明显的RCS减缩, 由图17(b)为C3相比于M1的相对RCS缩

减量的实测数据与仿真数据的对比。C3在 y 极化下有整体的RCS缩减趋势。在7.7 GHz处, RCS缩减量最大为5.38 dB。

在 x 极化与 y 极化下实测与仿真数据都存在一定的差异, 其中的差异是由于加工误差以及测试时反射屏摆放位置, 馈线和接口的传输损耗引起的, 经过反复测试, 其结果与仿真结果趋势基本一致。验证了所设计的超表面天线具有宽带低RCS特性。

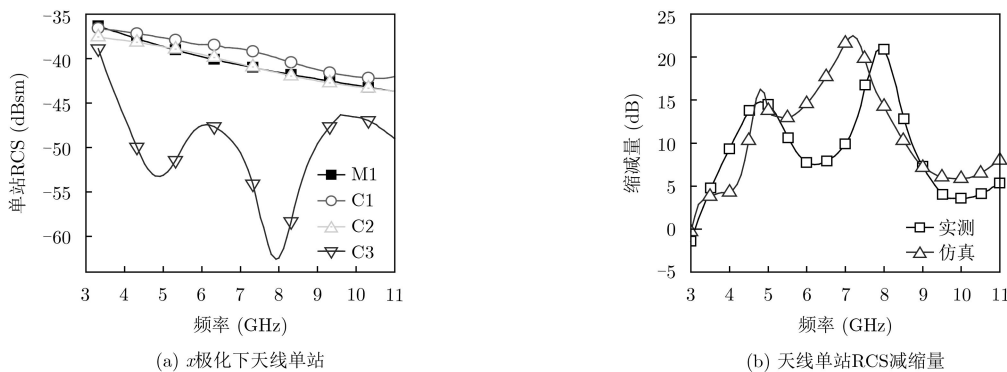


图 16 x 极化下天线阵列散射特性

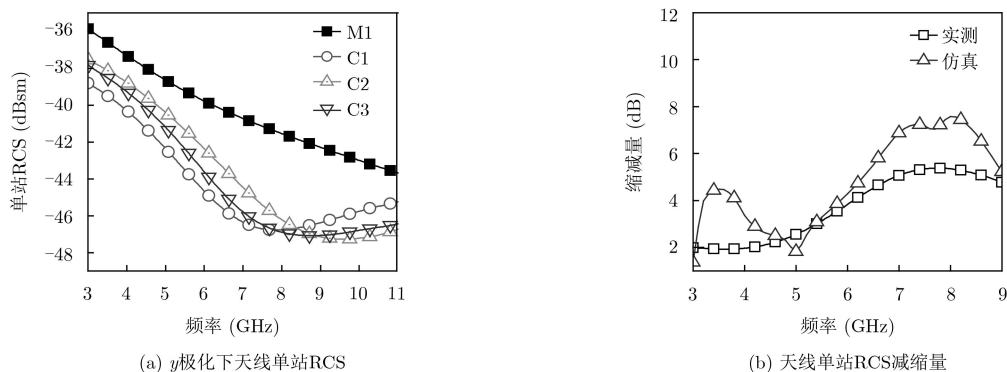


图 17 y 极化下天线阵列散射特性

4.2 超表面天线辐射性能测量

图18与图19为天线分别在6.7 GHz, .0 GHz处的实测 xoz 面、 $yo z$ 面辐射方向图。可以看出在谐振频带内, C3辐射性能基本与C1, C2一致。实测验证了2种天线单元组合成天线阵与单一天线组合成的天线阵在辐射性能上是几乎一致的。

5 结论

本文利用设计的天线单元同样具有电磁超表面单元的特性, 将天线单元既作为辐射单元又作为电磁超表面单元, 设计了一种宽带低散射超表面天线阵。通过将两种工作在同一模式、同一频段的天线

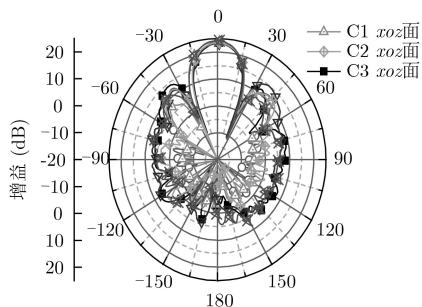


图 18 6.7 GHz处方向图

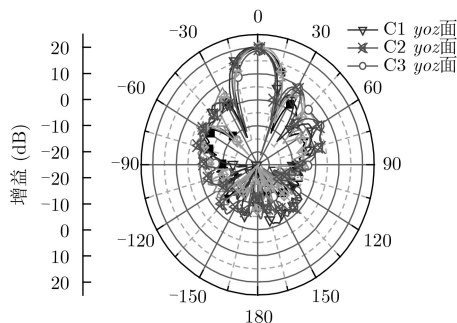


图 19 8.0 GHz处方向图

单元以棋盘形式布阵构造了 4×4 超表面天线阵, 利用相位相消及吸波原理分别实现2种极化下带内RCS减缩。本文的研究有效解决了天线阵辐射和散射不能兼顾的矛盾, 随着阵列规模的扩大同样可以实现较好的RCS减缩效果, 为大规模低散射天线阵提供了一个全新的设计思路。

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 & Propagation*, 2016, 10(4): 370–377. doi: [10.1049/iet-map.2015.0311](https://doi.org/10.1049/iet-map.2015.0311).
 - [2] 周禹龙, 曹彰玉, 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): 1146–1451. doi: [10.11999/JEIT160854](https://doi.org/10.11999/JEIT160854).
 - [3] RAJESH N, MALATHI K, RAJU S, *et al.* Design of vivaldi antenna with wideband radar cross section 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, LIU Ying, GONG Shuxi, *et al.* 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] LI Aobo, KIM S, 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).
 - [6] 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).
 - [7] 杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 等. 利用超材料吸波体减缩缝隙天线雷达散射截面[J]. *西安电子科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 40(5): 130–134. doi: [10.3969/J.issn.1001-2400.2013.05.02](https://doi.org/10.3969/J.issn.1001-2400.2013.05.02).
YANG Huanhuan, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Application of metamaterial absorber for RCS reduction of slot antenna[J]. *Journal of Xidian University*, 2013, 40(5): 130–134. doi: [10.3969/J.issn.1001-2400.2013.05.02](https://doi.org/10.3969/J.issn.1001-2400.2013.05.02).
 - [8] 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).
 - [9] VARAULT S, 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).
 - [10] 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).
 - [11] PAN Wenbo, HUANG Cheng, CHEN Po, *et al.* A low-RCS and high-gain partially reflecting 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).
 - [12] 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).
 - [13] 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).
 - [14] GHOSH S, BHATTACHARYYA S, CHAURASIYA D, *et al.* An ultrawideband ultrathin metamaterial absorber based on circular split rings[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 1172–1175. doi: [10.1109/LAWP.2015.2396302](https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2396302).
 - [15] ZHANG Chen, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Low RCS and broadband ME dipole antenna loading artificial magnetic conductor structures[J]. *Radioengineering*, 2017, 26(1): 38–44. doi: [10.13164/RE.2017.0038](https://doi.org/10.13164/RE.2017.0038).
- 刘 涛: 男, 1995年生, 博士生, 研究方向为天线设计、人工电磁材料设计等。
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。
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。
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。
丛丽丽: 女, 1991年生, 博士生, 研究方向为超材料设计, 天线阵雷达散射截面减缩等。