

具有超宽带RCS减缩特性的天线设计

吉地辽日* 曹祥玉 高 军

(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

摘 要: 该文设计了一种人工磁导体(AMC)单元,在8~20 GHz的超宽频带内,两种AMC结构能够实现 $180^\circ \pm 37^\circ$ 的反射相位差,将这两种单元组成棋盘结构时,能够实现入射电磁波的散射场相消,从而在超宽的频带内实现棋盘表面法向雷达散射截面(RCS)的显著减缩。同时,利用超表面天线的概念,设计馈电网络,将设计的AMC结构用做天线,仿真发现在9.08~10.30 GHz的范围内,天线的 S_{11} 小于-10 dB,可以实现天线的有效辐射。实测结果和仿真吻合较好,因此该文的棋盘结构可以实现具有RCS减缩特性的天线设计。

关键词: 天线; 棋盘结构; RCS减缩

中图分类号: TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)01-0115-08

DOI: 10.11999/JEIT180254

Metasurface Antenna Design with Ultra-wideband RCS Reduction

JIDI Liaori CAO Xiangyu GAO Jun

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

Abstract: In this paper, two novel Artificial Magnetic Conductor (AMC) structures, based on circular loop patch and substrate, are designed to realize 180° reflection phase difference in a wide frequency band. These two AMCs' reflection phase property is applied to redirecting the scattering fields of a radar target to reduce its Radar Cross Section (RCS). This method of RCS reduction can be realized by covering with a chessboard surface composed of two proposed AMC structures, so the RCS reduction in a wide frequency band can be achieved as well. Compared with the same-sized metallic surface, this proposed chessboard surface can reduce RCS drastically from 8 to 20 GHz under normally incident waves, and the RCS also can be reduced under obliquely incident waves. Meanwhile, this surface also can be used as antenna. By precisely designing feed network, the metasurface antenna can be designed. This antenna also has a low profile. The simulated impedance matching frequency band is from 9.08 to 10.30 GHz. Excellent agreement is obtained between simulation and measurement for metasurface antenna and chessboard surface. Such method gives a method for integrated design of antenna and metasurface, so the RCS reduction can be achieved, at the same time the radiation properties can be maintained.

Key words: Antenna; Chessboard surface; RCS reduction

1 引言

超材料表面(Metasurface)简称超表面,是一种人工设计的由半波长单元组成的超薄结构^[1],自2011年美国《科学》杂志上刊登了一篇关于使用超材料表面来实现电磁波的异常反射和异常透射以来^[2],超材料表面就引起了各国学者广泛的关注,作为一种具有亚波长结构的金属阵列,超表面能够灵活地操控电磁波,实现对反射波或者透射波的幅

度、相位和极化等特性进行人工调控^[3,4],因此,超表面在军事和民用上面均有重要的应用前景,比如目标隐身技术、微波与光电子器件以及天线技术等,超表面在提出后就一直成了超材料领域的研究热点^[5-8]。

人工磁导体(Artificial Magnetic Conductor, AMC)是超材料表面的一种,它又称为高阻抗表面,其具有的同相反射特性可以在军事隐身中具有重要的应用前景^[9],AMC的反射相位为 0° ,而理想电导体(Perfect Electric Conductor, PEC)的反射相位是 180° ,将两者按照一定的规律组合在一起,可以将垂直入射到其表面的电磁波散射相消,从而减少目标的后向散射^[9]。2007年,Paquary等人^[10]

收稿日期: 2018-03-19; 改回日期: 2018-10-24; 网络出版: 2018-10-31

*通信作者: 吉地辽日 jidiliaorikdy@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)

首次提出将AMC应用于减少目标的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS),自那时候起,研究者设计了工作在不同频段的各种不同的AMC结构[11-15]。近几年,AMC结构还被运用在编码超材料上[16-19],这提供了调控电磁波更加灵活的方法。通过对相位、幅度和极化等特性的编码,可以实现电磁波的波束分离、波束偏折、极化转换,在宽带范围内有效缩减目标RCS的功能[20]。

天线的隐身技术是军事应用中的研究热点,然而,由于天线本身是一个强辐射体,因此在保证天线辐射性能的同时减少天线的RCS是一个难点,随着超材料的兴起,在低可探测隐身技术中,将超材料加载到天线上可以实现天线的RCS减缩。例如,可将传统的棋盘结构和编码超材料加载到F-P/PRS天线上,在保持或提高天线辐射性能的同时,减缩天线的RCS[21,22]。通过在微带缝隙天线阵前端加载周期性的阻抗单元,在保持天线辐射性能的同时,也可以有效减缩微带缝隙天线阵的RCS[23]。对于微带天线的隐身效果,可以通过在天线周围加载棋盘型结构实现天线的RCS减缩,如文献[24]中将极化旋转表面排布成棋盘结构,并将其加载到天线的周围,实现了天线带内和带外RCS的减缩。

超表面天线是近年来出现的一种新型天线,传统的阵列天线中,相邻两个天线单元之间距离设计通常为半个波长,减少单元之间的互耦,而在超表面天线中,两个天线单元之间具有亚波长的距离,每个辐射单元都能与馈电网络具有良好的匹配,实现天线的有效辐射[25]。

本文基于圆环贴片结构和介质材料设计了两种AMC结构,并将圆环贴片用作辐射贴片,在超宽的频带内,8~20 GHz,两种AMC能实现 $180^\circ \pm 37^\circ$ 的反射相位差,将这两种AMC结构组成 2×2 的棋盘阵列,能够在8~20 GHz的范围内实现显著的RCS减缩,同时,在背面设计馈电网络,将这个棋盘阵列设计成超表面天线,仿真结果表明,在9.08~

10.30 GHz的频带范围内,天线的 S_{11} 小于-10 dB,能够实现天线的有效辐射,因此,这两种AMC结构组成的棋盘阵列可以在天线的带内和带外都能实现RCS的显著减缩,由此能实现具有RCS减缩特性的天线设计。

2 AMC结构的设计与分析

本文设计的AMC1的单元如图1(a)所示,由上层圆环金属贴片,中间介质基板,底层金属背板和穿过介质板的馈电金属针组成,其中金属部分是铜,电导率为 $\sigma=5.8 \times 10^7$ S/m,介质基板采用聚四氟乙烯玻璃布板,介电常数为2.65,损耗角正切为0.001,厚度为 $h=3$ mm。单元结构周期 $p=10$ mm,金属圆环贴片外半径为 $r=4.25$ mm,圆环宽度为 $w=2$ mm,当AMC1用作天线时,通过金属馈电金属针馈电。以单元的上表面作为相位参考面,用商用电磁仿真软件HFSS,将AMC1的单元放在无限周期边界中仿真,此时金属馈电针部分接匹配负载(输入阻抗设计为50 Ω)。AMC结构中反射相位是一个重要的性质,AMC结构谐振点的反射相位为 0° ,而金属的反射相位为 180° 。如图2(a)所示,AMC1产生相位零点的频率小于8 GHz,在8~20 GHz的频带范围内,AMC1都能实现全反射。AMC2的单元如图1(b)所示,由介质基板及覆在介质基板背面的金属背板组成,采用和AMC1相同的仿真方法,如图2(b)所示,AMC2产生相位零点的频率是15.3 GHz,在8~20 GHz的频带范围内,AMC2结构也能实现全反射。

当两种AMC结构的反射相位差为 180° 时,散射场会相互抵消,从而改变散射方向图,达到减缩RCS的目的[9]。为了拓展棋盘型结构的RCS减缩带宽,两种AMC结构的反射相位零点尽量设计在不同的频点。由散射理论可以知道,在垂直入射的情况下,和相同尺寸的金属相比,表面的RCS减缩可以表示为[9]

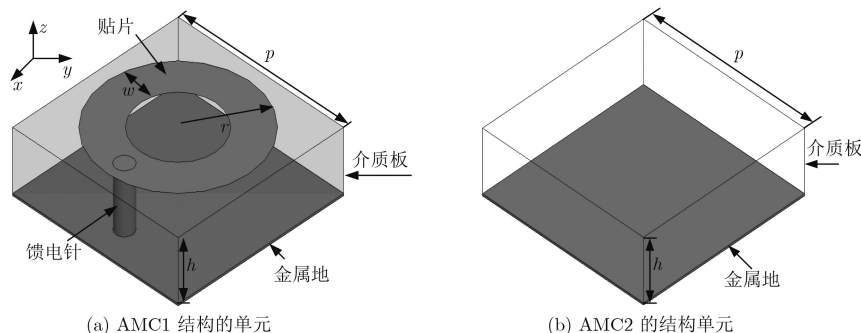


图1 AMC结构单元

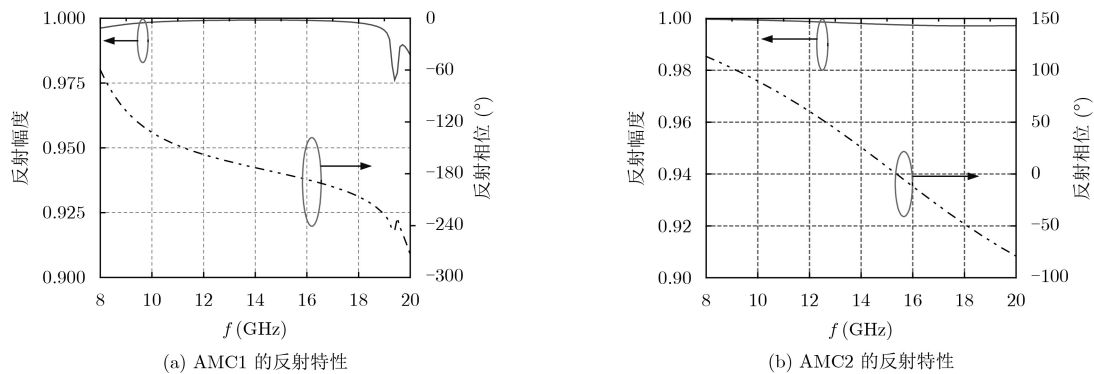


图2 AMC结构的反射特性

$$\text{RCS 减缩} = 10 \lg \left[(A_1 + A_2 e^{j\Delta}) / 2 \right]^2 \text{ dB} \quad (1)$$

其中, A_1 和 A_2 分别表示AMC1和AMC2的反射幅度, 对于能够实现全反射的AMC, A_1 和 A_2 都近似为1, Δ 表示AMC1和AMC2的反射相位差, 利用式(1), 垂直入射波情况下棋盘结构的法向RCS减缩随着反射相位差的变化曲线如图3所示。

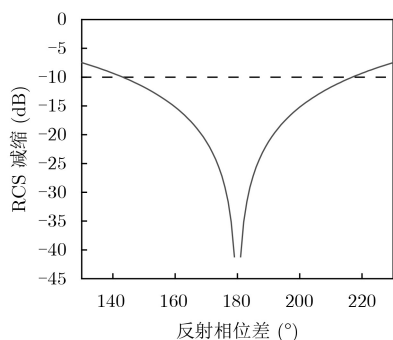


图3 理论计算的RCS减缩随两种AMC结构相位差的变化

由图3可知, 在反射相位差达到 $180^\circ \pm 37^\circ$ 的时候, 当棋盘是理想结构时, 所设计的棋盘结构能达到10 dB以上的RCS减缩。本文中所设计的两种AMC结构的反射相位差如图4所示, 可以看到, 8~20 GHz的频带范围内, 在垂直入射波的情况下, 两种AMC结构的反射相位差几乎都能达到 $180^\circ \pm 37^\circ$ (在9.8~11.7 GHz的频带范围内, 反射相位差最高达到了 221°)。

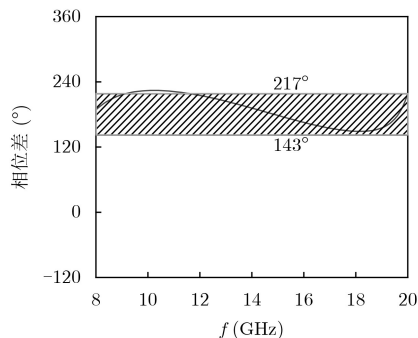


图4 两种AMC结构的反射相位差

3 棋盘结构的散射特性

如果将设计的两种AMC结构组成理想的棋盘结构, 利用式(1), 结合两种AMC的反射相位差, 可以计算出无限周期棋盘结构理论上的RCS减缩效果, 如图5所示, 可以看出, 在垂直入射波的情况下, 理想的棋盘结构在8~20 GHz的频带范围内都实现了显著的RCS减缩, 其中在9.8~11.7 GHz这两个较窄的频带范围内, RCS的减缩量没有达到10 dB, 这是因为在这两个频带范围内, 两种AMC结构的反射相位差超过了 217° , 达到了 221° , 在这两个频带范围内, RCS减缩量也达到了8.6 dB以上。

图6表示的是本文设计的 2×2 的棋盘型结构(总体尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$), 为了满足仿真中

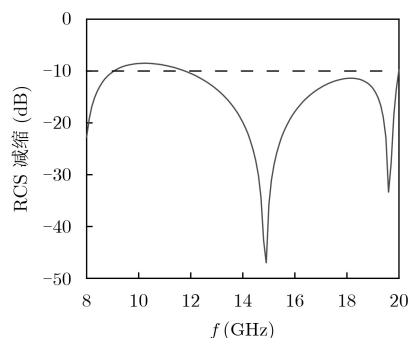


图5 理论计算的RCS减缩随频率的变化

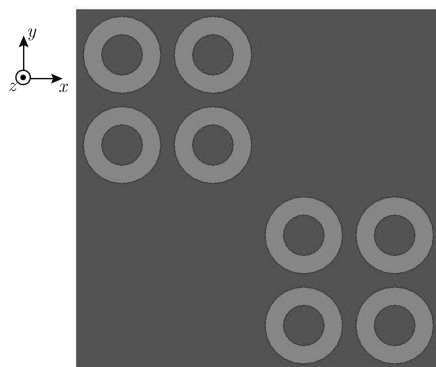


图6 设计的棋盘表面

要求的无限周期边界条件,同时考虑仿真的效率和设计的难易程度,每个AMC结构都由 2×2 个单元组成。

在电磁波垂直入射的情况下,利用HFSS仿真软件仿真所设计的棋盘结构,并和相同尺寸的金属平板对比,分析本文设计的棋盘结构的性能,仿真过程中馈电金属针依然接匹配负载,图7(a)表示的是棋盘结构和相同尺寸金属平板的单站RCS对比图,可以看到,在8~20 GHz的频带范围内,本文所设计的棋盘结构的单站RCS相比于同尺寸的金属表面,有非常显著的减缩效果。除了垂直入射,图7(b)表示入射角为 15° 时,金属和棋盘表面的镜像双站RCS比较,可以看到,在斜入射时,棋盘表面在镜像方向也能实现显著的RCS减缩,在仿真分析中,垂直入射和斜入射时电磁波均是 x -极化波。

为了更好地理解棋盘结构RCS减缩的效果,给出天线带内9.62 GHz处金属和棋盘表面的散射方向图比较,并给出天线带外13.8 GHz处金属和棋盘表面的散射方向图比较,将散射方向图投影到 u - v 平面上, $u=\sin \theta \cos \varphi$, $v=\sin \theta \sin \varphi$,其中 (θ, φ) 是观察方向,如图8。由散射方向图可以看出,在天线工作的频带内和频带外,棋盘结构均能够实现法向的散射波相位相消,从而实现了RCS减缩。

4 天线辐射特性

传统的阵列天线中,相邻两个天线单元之间距离半个波长,减少单元之间的互耦,而在超表面天线中,两个天线单元之间具有亚波长的距离,使每个辐射单元都能与馈电网络具有良好的匹配,并且

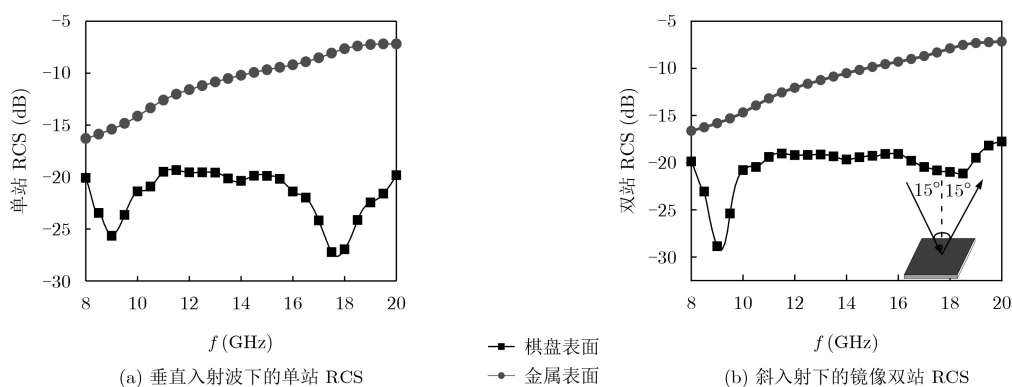


图7 RCS减缩性能

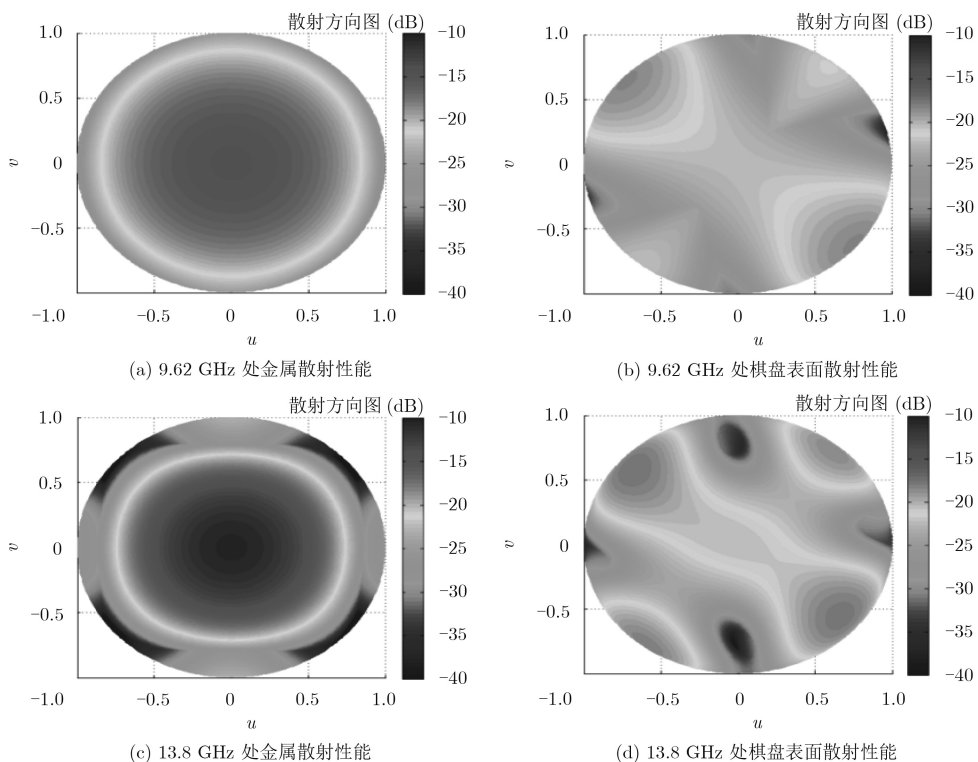


图8 散射方向图比较

单元之间具有的互耦效果有助于实现天线的有效辐射^[20]，基于这样的理论，将本文设计的棋盘表面用作阵列天线，在天线的背面设计馈电网络，天线结构及背面馈电网络如图9。

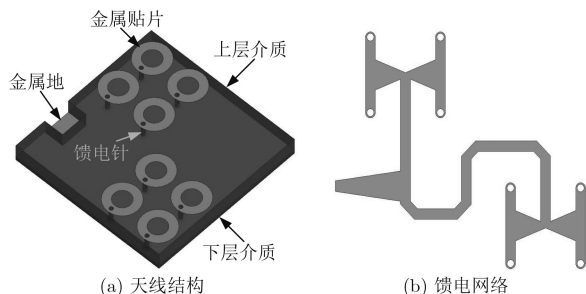


图9 设计的天线

其中上层介质的厚度为3 mm，下层介质的厚度为0.8 mm，仿真得到天线 S_{11} 的参数如图10所示，可以看到，在9.08~10.3 GHz的频带范围内，天线的 S_{11} 小于-10 dB，能够实现天线的有效辐射，天线的谐振频点在9.62 GHz。

天线在9.62 GHz处的E面和H面的辐射方向图如图11所示，可以看到，天线的方向图偏离法向9°左右，这是因为天线两部分馈电时因馈线长度不同引入的相位差造成的，在实际应用中可以通过倾

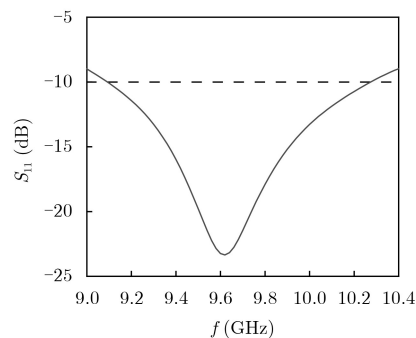


图10 天线 S_{11} 参数

斜放置天线的方法来克服。

图12给出9.62 GHz处天线的仿真3维辐射方向图，可以看到，天线能够实现较好的辐射性能。

仿真得到天线最大辐射方向的增益如图13所示，在天线有效辐射的频带范围内，天线最大辐射方向的增益都能达到9.8 dB以上。

5 加工与实测

为了验证设计的有效性，本文采用印刷电路板技术加工出所设计的表面，并在微波暗室环境下，利用天线测试系统及矢网仪测试出天线的回波损耗 S_{11} 特性，并用标准喇叭天线采用自由空间法测量

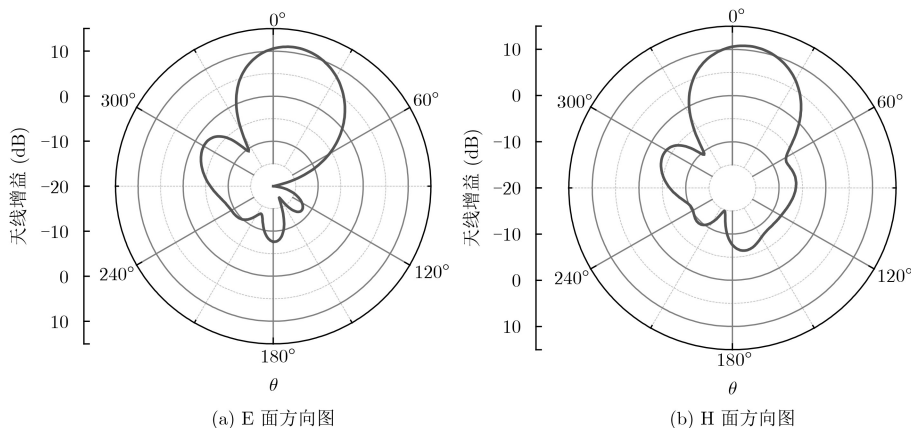


图11 天线在9.62 GHz处的仿真方向图

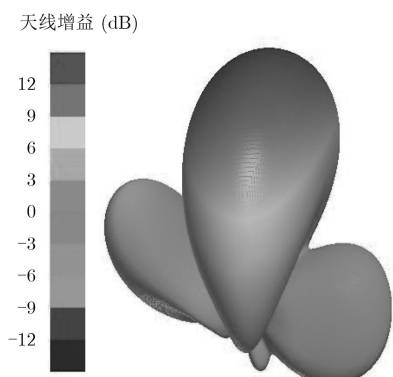


图12 天线在9.62 GHz处的仿真辐射方向图

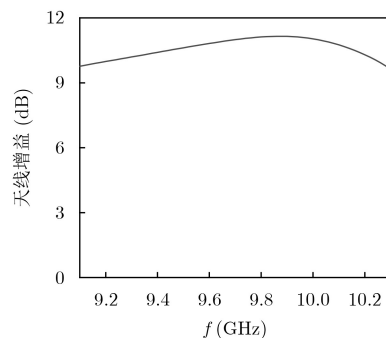


图13 天线最大辐射方向上的增益

出天线的辐射方向图。天线辐射测量环境如图14(a)所示,辐射测量结果如图14(b)及图15所示。为了验证所设计棋盘表面的RCS减缩性能,在微波暗室中对样品进行测量,在垂直入射时,反射幅度的减缩量可以近似为RCS减缩量,测量装置如图16所示,两个标准喇叭分别作为发射电磁波和接收电磁波的装置,测量样品放置在白色泡沫上,入射波和反射波都垂直于测量样品,测量时,先测出同尺寸金属板的反射幅度,再测量样品的反射幅度,两者的差就是反射幅度的减缩量,所测的反射幅度的减缩量可以近似为RCS减缩。

由测试结果可以看出,天线的辐射性能和仿

真结果吻合较好,测试结果和仿真结果相比谐振点有细微的频率偏移,这主要是加工误差、焊接误差和测试环境所造成的,加工测试的结果说明了此类超表面天线设计的有效性。散射的仿真和测试曲线在低频处RCS减缩量较小,这是因为在低频处设计的棋盘表面电尺寸较小造成的,而理论计算是基于无限大平面的假设,所以理论计算的结果是理想值,但三者的减缩趋势是一致的,测试和仿真相比具有一定的频偏。散射的测试和仿真结果表明这种超表面天线还可以用作减缩RCS的棋盘结构,和同尺寸的金属板相比,它具有良好的RCS减缩效果。

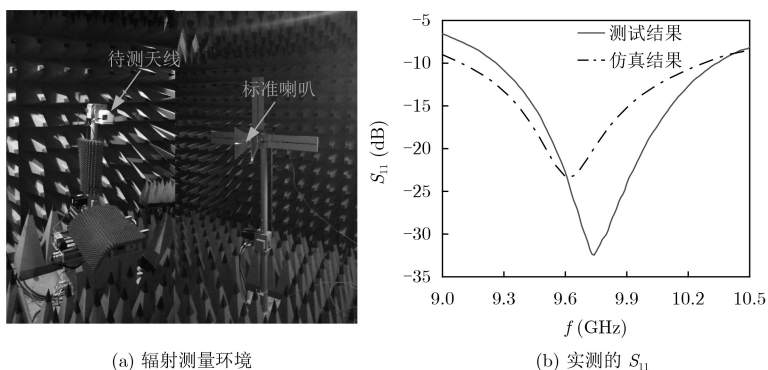


图 14 天线测量值

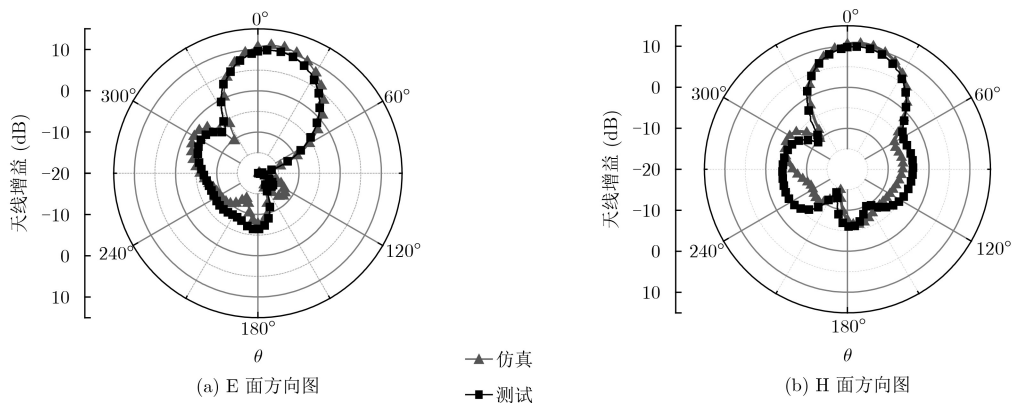


图 15 天线9.62 GHz实测方向图

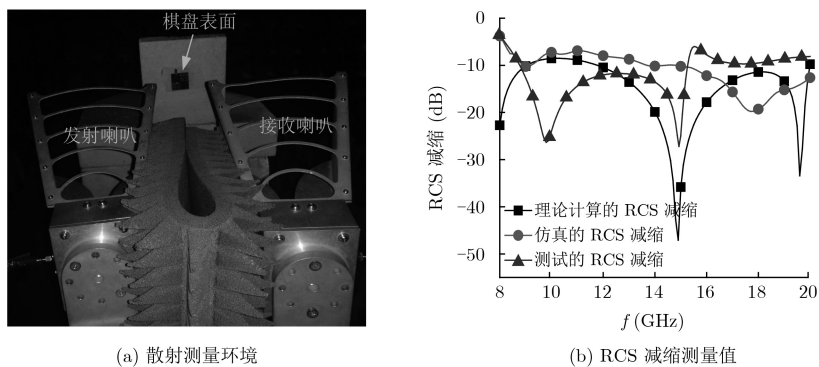


图 16 棋盘表面的散射测量

6 结论

本文设计了一种具有超宽带RCS减缩的天线, 在9.08~10.3 GHz的频带范围内, 天线的 S_{11} 小于-10 dB, 能够实现天线的有效辐射, 天线的谐振频点在9.62 GHz。将所设计的天线用作减缩RCS的棋盘结构, 在垂直入射波的情况下, 棋盘表面能在8~20 GHz的超宽频带内, 实现RCS的有效减缩, 从而实现天线带内和带外的有效RCS减缩, 因此, 本文所设计的天线具有双功能, 在实现有效辐射的同时, 又能有效减缩天线的RCS, 这在未来军用隐身天线方面具有重要的应用价值。

参考文献

- [1] TRETYAKOV S A. Metasurfaces for general transformations of electromagnetic fields[J]. *Philosophical Transactions A*, 2017, 373(2049): 1–8. doi: [10.1098/rsta.2014.0362](https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0362).
- [2] GLYBOVSKI S B, TRETYAKOV S A, BWLOV P A, *et al.* Metasurfaces: From microwaves to visible[J]. *Physics Reports*, 2016, 634: 1–72. doi: [10.1016/j.physrep.2016.04.004](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2016.04.004).
- [3] 李文惠, 张介秋, 屈绍波, 等. 基于极化旋转超表面的圆极化天线设计[J]. *物理学报*, 2016, 65(2): 024101. doi: [10.7498/aps.65.024101](https://doi.org/10.7498/aps.65.024101).
LI Wenhui, ZHANG Jieqiu, QU Shaobo, *et al.* A circular polarization antenna designed based on the polarization conversion metasurface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(2): 024101. doi: [10.7498/aps.65.024101](https://doi.org/10.7498/aps.65.024101).
- [4] EPSTEIN A and ELEFTHERIADES G V. Huygens' metasurfaces via the equivalence principle: Design and applications[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(2): A31–A42. doi: [10.1364/JOSAB.33.000A31](https://doi.org/10.1364/JOSAB.33.000A31).
- [5] ZHENG Yuejun, ZHOU Yulong, GAO Jun, *et al.* Ultra-wideband polarization conversion metasurface and its application cases for antenna radiation enhancement and scattering suppression[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 16137. doi: [10.1038/s41598-017-16105-x](https://doi.org/10.1038/s41598-017-16105-x).
- [6] ZHAO Yi, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Broadband low-RCS metasurface and its application on antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(7): 2954–2963. doi: [10.1109/TAP.2016.2562665](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2562665).
- [7] CHAURASIYA D, GHOSH S, BHATTACHARYYA S, *et al.* Compact multi-band polarisation-insensitive metamaterial absorber[J]. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 2016, 10(1): 94–101. doi: [10.1049/iet-map.2015.0220](https://doi.org/10.1049/iet-map.2015.0220).
- [8] LIU Shuo and CUI Tiejun. Flexible controls of scattering clouds using coding metasurfaces[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 37545. doi: [10.1038/srep37545](https://doi.org/10.1038/srep37545).
- [9] CHEN Wengang, BALANIS C A, and BIRTCHER C R. Checkerboard EBG surfaces for wideband radar cross section reduction[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(6): 2636–2645. doi: [10.1109/TAP.2015.2414440](https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2414440).
- [10] 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).
- [11] CHEN Wengang, BALANIS C A, and BIRTCHER C R. Dual wide-band checkerboard surfaces for radar cross section reduction[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(6): 4133–4138. doi: [10.1109/TAP.2016.2583505](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2583505).
- [12] MIGHANI M and DADASHZADEH G. Broadband RCS reduction using a novel double layer chessboard AMC surface[J]. *Electronic Letters*, 2016, 52(14): 1253–1255. doi: [10.1049/el.2016.1214](https://doi.org/10.1049/el.2016.1214).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] ESMAELI S H and SEDIGHY S H. Wideband radar cross-section reduction by AMC[J]. *Electronic Letters*, 2016, 52(1): 70–71. doi: [10.1049/el.2015.3515](https://doi.org/10.1049/el.2015.3515).
- [16] CUI Tiejun, QI Meiqing, WAN Xiang, *et al.* Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: Science and Applications*, 2014, 3: e218. doi: [10.1038/lsa.2014.99](https://doi.org/10.1038/lsa.2014.99).
- [17] LIU Shuo and CUI Tiejun. Flexible controls of terahertz waves using coding and programmable metasurfaces[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(4): 4700312. doi: [10.1109/JSTQE.2016.2599273](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2016.2599273).
- [18] LIU Shuo, CUI Tiejun, ZHANG Lei, *et al.* Convolution operations on coding metasurface to reach flexible and continuous controls of terahertz beams[J]. *Advanced Science*, 2016, 3: 1600156. doi: [10.1002/advs.201600156](https://doi.org/10.1002/advs.201600156).
- [19] GAO Lihua, CHENG Qiang, YANG Jing, *et al.* Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces[J]. *Light: Science and Applications*, 2015, 4: e324. doi: [10.1038/lsa.2015.97](https://doi.org/10.1038/lsa.2015.97).
- [20] 张磊, 刘硕, 崔铁军. 电磁编码超材料的理论与应用[J]. *中国光学*, 2017, 10(1): 1–12. doi: [10.3788/CO.20171001](https://doi.org/10.3788/CO.20171001).
ZHANG Lei, LIU Shuo, and CUI Tiejun. Theory and application of coding metamaterials[J]. *Chinese Optics*,

- 2017, 10(1): 1–12. doi: [10.3788/CO.20171001](https://doi.org/10.3788/CO.20171001).
- [21] ZANG Lei, WAN Xiang, LIU Shuo, *et al.* Realization of low scattering for a high-gain fabry-perot antenna using coding metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(7): 3374–3383. doi: [10.1109/TAP.2017.2700874](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2700874).
- [22] LI Kun, LIU Ying, JIA Yongtao, *et al.* A circularly polarized high-gain antenna with low RCS over a wideband using chessboard polarization conversion metasurfaces[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(8): 4288–4292. doi: [10.1109/TAP.2017.2710231](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2710231).
- [23] SIMONE G, FILIPPO C, and AGOSTINO M. Wideband radar cross section reduction of slot antennas arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(1): 163–173. doi: [10.1109/TAP.2013.2287888](https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2287888).
- [24] LIU Ying, HAO Yuwen, LI Kun, *et al.* Radar cross section reduction of a microstrip antenna based on polarization conversion metamaterial[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 80–83. doi: [10.1109/LAWP.2015.2430363](https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2430363).
- [25] BADAWE M E, ALMONEEF T S, and RAMAHI O M. A true metasurface antenna[J]. *Scientific Reports*, 2015, 6: 19268. doi: [10.1038/srep19268](https://doi.org/10.1038/srep19268).
- 吉地辽日：男，1993年生，博士生，研究方向为超材料与超材料的
天线应用。
- 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。