

基于双谐振棋盘式超表面的宽带 RCS 缩减技术*

赵智明¹, 李小平¹, 董果香¹, 徐 聪², 赵 良²

(1 西安电子科技大学空间科学与技术学院 西安 710071

2 中国航天科技集团第一研究院第十研究所 北京 100076)

摘要:为实现宽频带的雷达散射截面(RCS)缩减效果,提出一种基于棋盘式超表面的RCS缩减技术,可达到宽带RCS缩减且极化不敏感的效果。介绍了提高RCS缩减带宽的原则,设计了X波段的棋盘式超表面,通过电磁散射抵消技术,电磁波经超表面反射后分散向不同的方向,实现了异常反射从而降低RCS。与普通棋盘式超表面不同,为了克服一般超表面都有的相位收敛问题,提出了双谐振棋盘式超表面,即用两种谐振频率不同的结构组成双谐振单元结构,使单元具有均匀相位差的频段得以拓宽,从而扩展了超表面的缩减带宽,实现了10 dB缩减带宽达到8 GHz~14.5 GHz且极化不敏感的效果,通过仿真证明双谐振棋盘式超表面可以实现宽频率范围的RCS缩减效果,且极化不敏感。

关键词: 棋盘式超表面; 雷达散射截面(RCS); 电磁抵消; 双谐振单元

中图分类号: TJ765.5 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)06-0084-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210409001

引用格式:赵智明,李小平,董果香,等.基于双谐振棋盘式超表面的宽带RCS缩减技术[J].遥测遥控,2021,42(6):84-90.

Wideband Radar Cross-Section reduction on checkerboard metasurface with dual resonant unit cells

ZHAO Zhiming¹, LI Xiaoping¹, DONG Guoxiang¹, XU Cong², ZHAO Liang²

(1. Xidian University, School of Aerospace Science and Technology, Xi'an 710071, China;

2. The 10th Research Institute of the First Research Institute of China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to achieve broadband Radar Cross-Section(RCS) reduction, a RCS reduction technology based on checkerboard metasurface is proposed, which can achieve broadband RCS reduction and polarization with insensitivity. We also introduces the principle of improving the RCS reduction bandwidth and designs a X band checkerboard metasurface by the electromagnetic scattering canceling technology so that the electromagnetic wave is dispersed to different directions after the reflection of the metasurface, in which way the RCS of it is reduced. In this study, double-resonant checkerboard metasurface is putted forward to overcome the problem of phase convergence which is common among ordinary checkerboard metasurfaces. Double-resonant checkerboard metasurfaces consist of two different structures of two different resonant frequency can broaden the unit homogeneous phase difference, in which way the 10 dB RCS reduction bandwidth is from 8 to 14.5Ghz with polarization and insensitivity. The simulation results show that the double-resonance checkerboard metasurface can realize RCS reduction of wide bandwidth and polarization with insensitivity.

Key words: Checkerboard metasurface; Radar Cross-Section (RCS); Electromagnetic cancellation; Dual resonant checkerboard metasurface

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210409001

Citation: ZHAO Zhiming, LI Xiaoping, DONG Guoxiang, et al. Wideband Radar Cross-Section reduction on checkerboard metasurface with dual resonant unit cells[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(6): 84-90.

引 言

越来越多的人关注隐身技术，将其用于减少金属物体的散射电磁场。隐身技术的关键是降低目标的雷达波散射，其中最重要的就是减缩其雷达散射截面 RCS (Radar Cross-Section)。

目前，通用且高效的 RCS 减缩方法主要有两种。一种是改变目标外形结构^[1]，即对飞行器采用特殊的外形设计或者对其各个方向所在平面和边沿周围形状进行改动和调整，使得能量散射到其它方向，以实现在特定的角度区域内有效地降低雷达回波强度。该方法的不足之处在于，电磁隐身观点认为的适宜的外形与空气动力学的要求可能不一致。另一种是加载雷达吸波材料^[2]，利用该材料可将电磁波能量转换成欧姆损耗的特性达到明显减弱目标雷达散射截面的目的，但是该方法对雷达的目标辐射性能影响较大。所以，越来越多的科研工作者在电磁隐身技术方面投入大量的精力，把如何更好地兼顾目标辐射性能与散射性能当作他们的研究焦点。

与其它 RCS 缩减技术相比，人工电磁超表面用于 RCS 缩减具有以下优点：丰富的调控能力、轻薄的外形优势、对目标外形没有要求、可实现宽频带的异常反射和随机反射，由此可以实现宽频带的 RCS 缩减。人工电磁超材料用于 RCS 缩减技术已经有一段历史，通过一定方式排列其单元结构，可以实现异常散射特性，将电磁波反射到非常规方向上，从而降低其 RCS。

近些年，将超表面 Metasurface 用于 RCS 缩减的方法开始得到越来越多的关注^[3]，主要分为相位梯度表面、棋盘式超表面、编码超材料等。相位梯度表面将入射波反射到另一个方向，其以广义斯涅尔定律为基础^[4]，设计人工电磁材料表面的单元排布，在材料界面上引入相位、幅度突变，对入射电磁波实现异常调控，使其反射波的传播方向朝一个方向偏折，从而实现隐身功能^[5]。但其只能对单极化电磁波起作用，无法实现极化无关。

对于 RCS 缩减，棋盘式超表面是一个非常有效的结构。这种结构需两种正交的人工磁导体结构单元组成^[6,7]。其隐身原理在于相邻单元的电磁对消，即两单元的反射电磁波幅度相等，相位相反。为了实现宽带 RCS 缩减，两个单元必须在相当宽的一个频段内保持反射波等幅反相。为了达到这个效果，两个单元的反射相位曲线必须在宽频段内保持相似的变化形式。由于非线性问题使它们的反射相位呈非均匀变化^[8-10]，因此，保持两条相位曲线有稳定的相位差较难实现。有一些方法可以解决这个问题^[11-18]，例如不均匀层^[13]、混合 AMC (Artificial Magnetic Conductor) 表面^[17]和编码扩散元表面^[14]，但是以上方法较为复杂且不易实现，所以，本文考虑采用单层双谐振单元^[18]来扩展 RCS 缩减带宽，此方法效果好且便于实现，通过仿真验证表明，双谐振棋盘式超表面可以实现宽频率范围的 RCS 缩减效果，且极化不明显。

1 双谐振单元的设计与棋盘式超表面的实现

1.1 棋盘式超表面作用机理

棋盘超表面模型如图 1 所示。根据相消干涉原理，棋盘式超表面由两种全反射且反射相位不同的单元 A_1 、 A_2 组成，其反射波幅度相同，反射相位分别为 P_1 、 P_2 ，其令一个金属板的散射能量为 E_i ，棋盘式超表面散射能量为 E_s 。与同尺寸的金属平板相比，棋盘式超表面的 RCS 缩减计算方式可以表示为式 (1)。由式 (1) 可知，要获得 RCS 缩减在 10 dB 及以上， P_1 、 P_2 所需满足的关系式如式 (2) 所示。

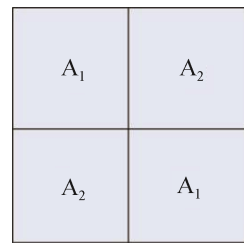


图 1 棋盘式超表面模型
Fig. 1 The model of checkerboard metasurface

$$\text{RCS reduction} = 10 \lg \left[\frac{\lim_{r \rightarrow \infty} \left[4\pi r^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \right]}{\lim_{r \rightarrow \infty} \left[4\pi r^2 (1)^2 \right]} \right] = 10 \lg \left[\frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \right] \quad (1)$$

经推导化简，可得

$$\text{RCS reduction} = 10 \lg \frac{1 + \cos(P_1 - P_2)}{2} \quad | \quad (P_1 - P_2 \neq 180^\circ) \quad (2)$$

要实现大于 10 dB 的 RCS 缩减, P_1 、 P_2 需满足以下关系式

$$143^\circ \leq |P_1 - P_2| \leq 217^\circ \quad (3)$$

当 $P_1 - P_2 = 180^\circ$, 式 (2) 无解, 此时 A_1 、 A_2 单元反射相位完全相反, 缩减效果最好。

1.2 双谐振单元建立

在这一部分, 为拓宽满足式 (2) 的频带宽度, 提出使用双谐振结构来实现此效果。

两个不同单元结构分别如图 2 (a)、图 2 (b) 所示, 单元结构在 TLY-5 介质板上, 介质板的介电常数为 2.2, 损耗因数为 0.000 9, 介质板厚度为 3.175 mm, 介质板边长为 15 mm×15 mm, 反射相位随着半径的变化分别如图 2 (c)、图 2 (d) 所示, 可以看出当圆环中有条幅时, 具有均匀相位差的频率 (谐振频率) 转向更高的频带, 且两结构具有均匀相位差的频带较为狭窄, 这是由于反射相位的收敛性导致, 会严重影响其隐身效果。而本研究将两者以一定方式结合起来, 使这一问题得到大幅改善。

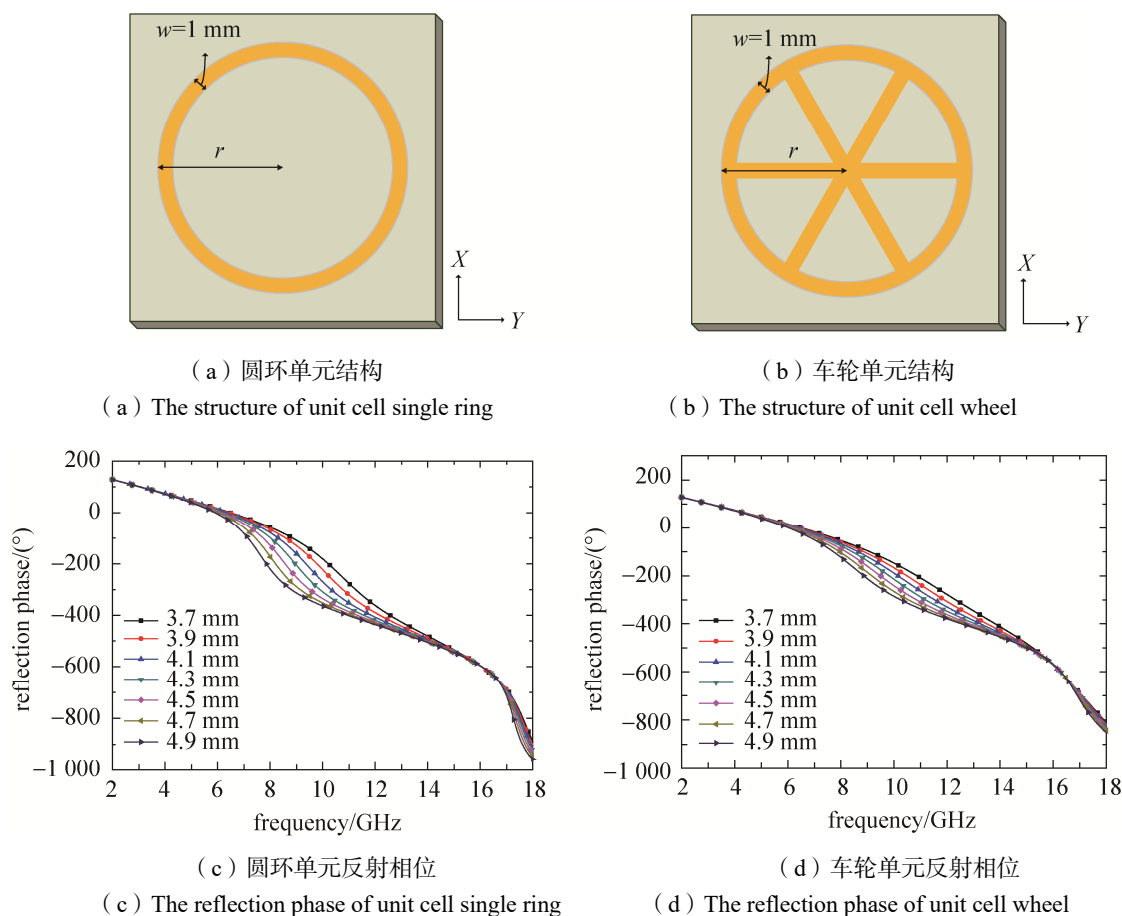


图 2 圆环和车轮结构及它们的反射相位

Fig. 2 The structure of unit cell single ring and wheel and their reflection phase

本研究将圆环和车轮结构组成单元如图 3 (a) 所示, 该单元为双谐振单元, $w_1=0.075$ mm, $w_2=1$ mm, 其反射相位随着半径 r_1 的变化如图 3 (b) 所示, 可以看出, 双谐振单元具有比前两种结构单元都宽很多的具有均匀相位差的频带。经对比以及进一步优化, 分别选取 $r_1=3.93$ mm 组成单元结构 A#1, 与 $r_1=4.8$ mm 组成单元结构 A#2, 其反射幅度如图 3 (c) 所示, 其反射差如图 3 (d) 所示, 可以看出 A#1 与 A#2 在全频带均为全反射, 在 8 GHz~14.5 GHz 频带内满足式 (2)。

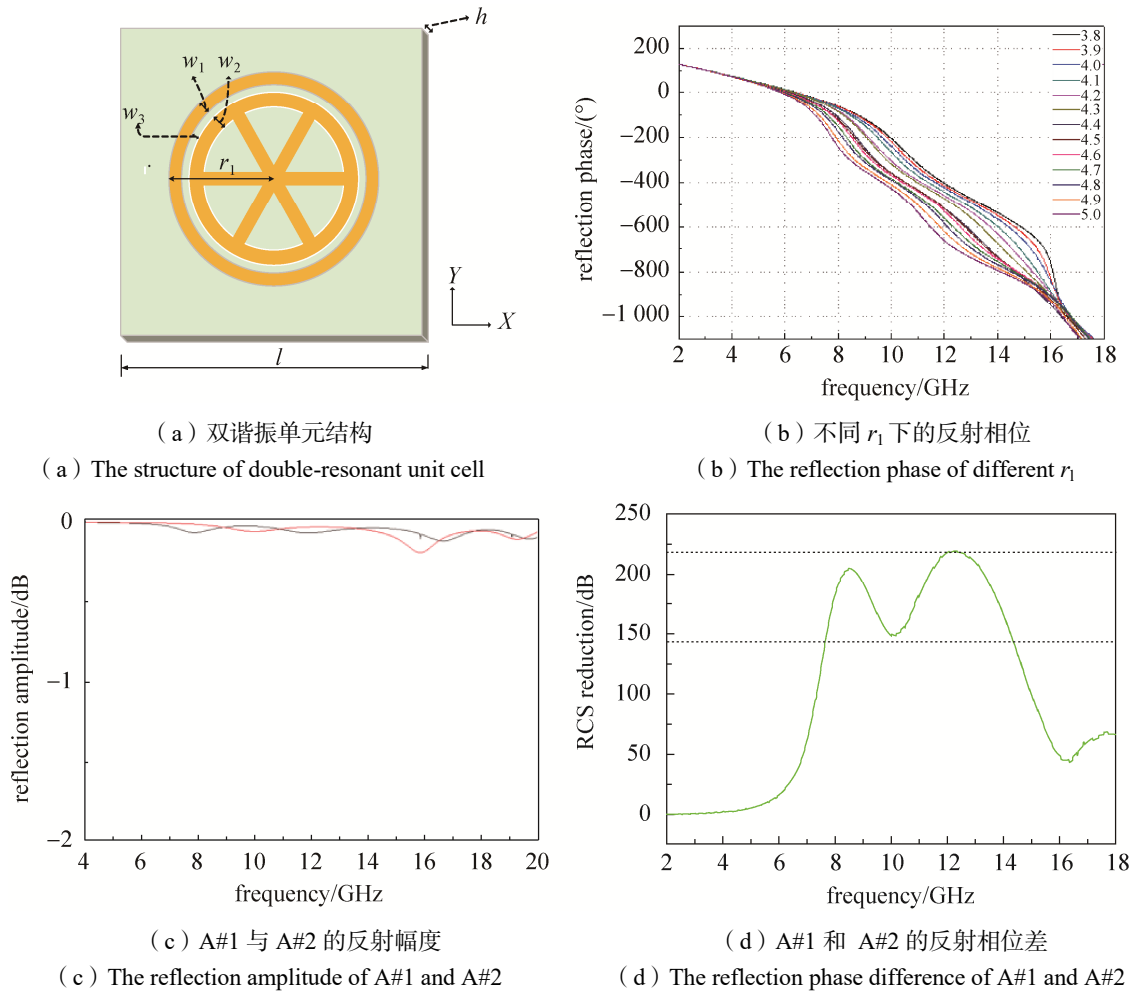


图 3 双谐振单元结构和 A#1 与 A#2 的参数

Fig. 3 The structure of double-resonant unit cell and the index of A#1 and A#2

2 棋盘式超表面建立与仿真结果验证

2.1 棋盘式超表面的建立

图 4 为棋盘超表面整体结构，由结构单元 A#1 与 A#2 组成。整体的棋盘式超表面尺寸为 150 mm×150 mm。

2.2 棋盘式超表面的仿真结果

全波仿真通过 CST 三维电磁场仿真软件的时域求解器进行，超表面在 xoy 平面上放置，电磁波通过 z 轴方向垂直向下入射，对于 x 极化方向与 y 极化方向的电磁波，超表面与同尺寸金属板的 RCS 缩减结果分别如图 5 (a)、图 5 (b) 所示。可以看出对 x 极化波，在 8 GHz~14.5 GHz 均可以实现大于 10 dB 的 RCS 缩减；对于 y 极化波，除 12.5 GHz~13.5 GHz 外稍差一点，在 8 GHz~14.5 GHz 也可以达到大于 10 dB 的 RCS 缩减。由于电磁波的矢量特性，超表面对任意极化电磁波均可以有 10 dB 以上 RCS 缩减，故其具有极化无关功能。

图 6 (a)、图 6 (b) 所示是棋盘式超表面与金属板在 10 GHz 处，对于 x 极化波的 RCS 散射图；图 6 (c)、图 6 (d) 所示是棋盘式超表面与金属板在 10 GHz 处，

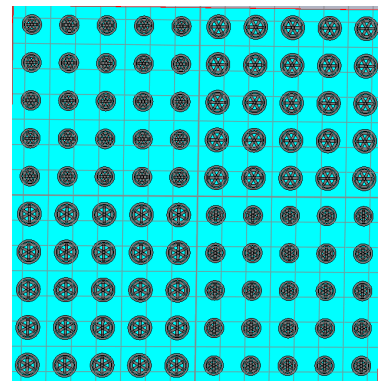


图 4 棋盘式超表面整体结构
Fig. 4 The whole structure of checkerboard metasurface

对于 y 极化波的 RCS 散射图。可以看出, 电磁波在经棋盘式超表面反射后四散开来。

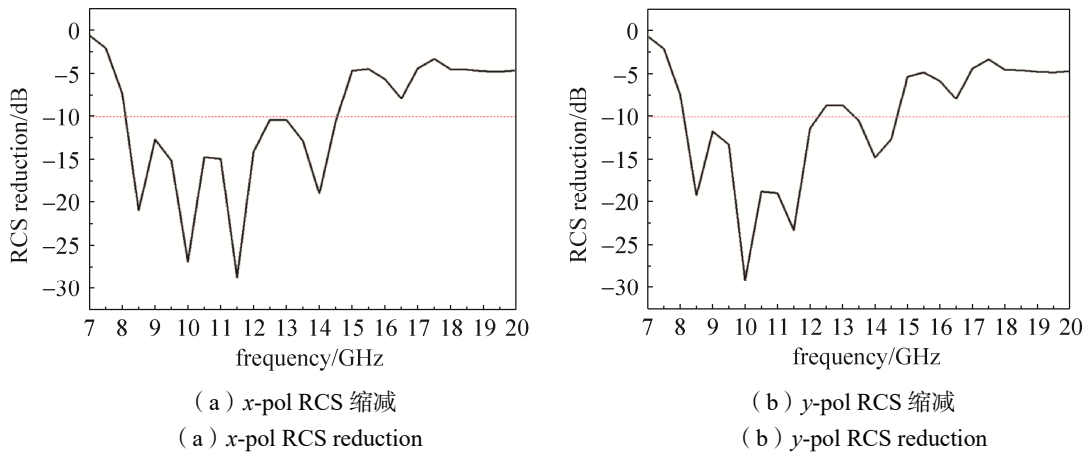


图 5 超表面对于不同极化电磁波的 RCS 缩减仿真结果

Fig. 5 Simulation results of RCS reductions of electromagnetic waves with different polarization directions

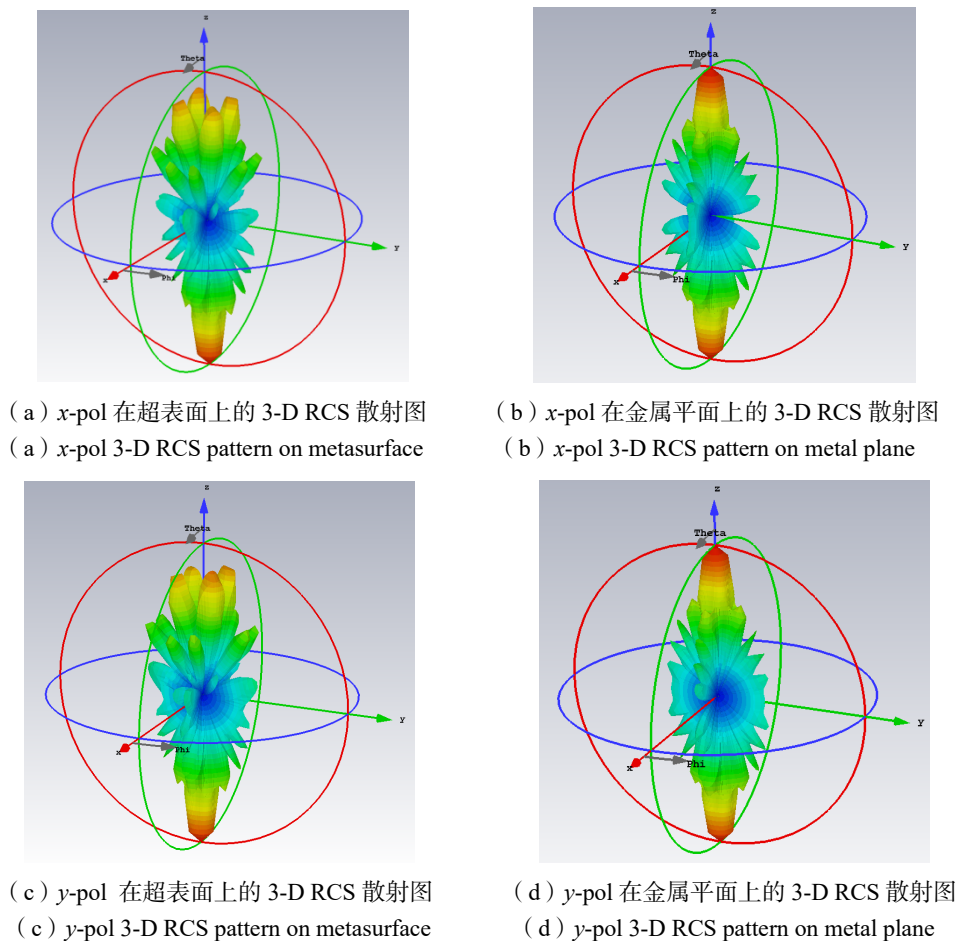


图 6 不同极化方向下在 10 GHz 处超表面和金属板的 RCS 散射图

Fig. 6 3-D RCS pattern for checkerboard metasurface and metal plane of electromagnetic waves with different polarization directions in 10 GHz

2.3 新式棋盘式超表面

将棋盘式超表面的 A#1 单元加上四个四分之一圆环组成 B#1 单元, 如图 7 所示, 其中 $r_3=2\text{ mm}$, $r_4=0.5\text{ mm}$ 。B#1 与 A#2 组成新式棋盘式超表面结构如图 8 所示。新式棋盘式超表面的 RCS 与原棋盘式

超表面的 RCS 对比对于 x 极化波与 y 极化波分别如图 9 (a)、图 9 (b) 所示, 与同尺寸金属板的 RCS 缩减对于 x 极化波与 y 极化波分别如图 9 (c)、图 9 (d) 所示。可以看出, 在 8 GHz~14.5 GHz 内, 新式棋盘式超表面 RCS 相比原棋盘式超表面 RCS 有明显的降低。

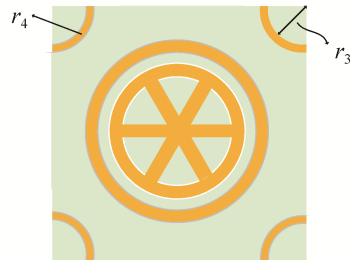


图 7 B#1 单元结构

Fig. 7 Structure of unit cell B#1

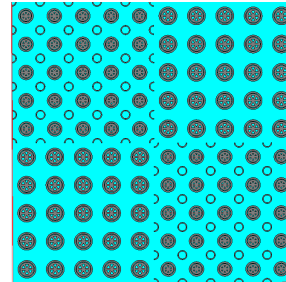
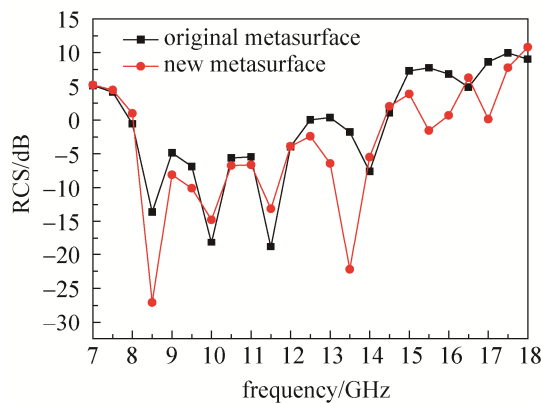


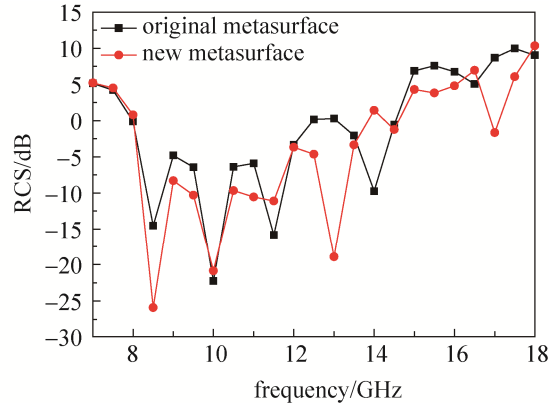
图 8 新式棋盘式超表面结构

Fig. 8 Structure of new checkerboard metasurface



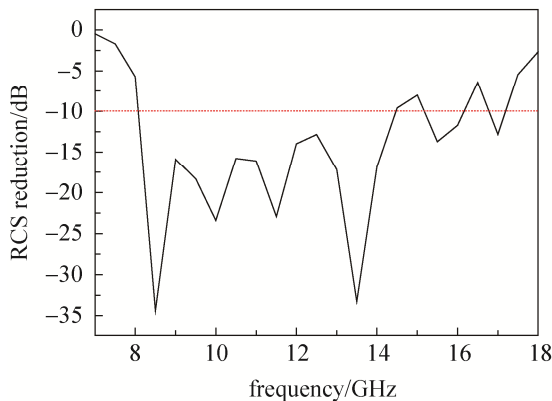
(a) x 极化波的新式超表面与原超表面的 RCS

(a) x -pol RCS of original metasurface and new metasurface



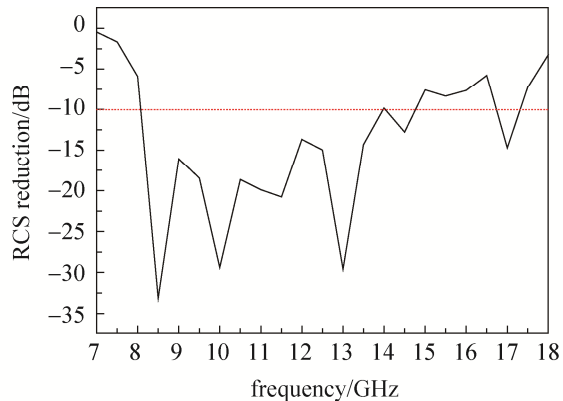
(b) y 极化波的新式超表面与原超表面的 RCS

(b) y -pol RCS of original metasurface and new metasurface



(c) x 极化波的新式超表面的 RCS 缩减

(c) x -pol RCS reduction of new metasurface



(d) y 极化波的新式超表面的 RCS 缩减

(d) y -pol RCS reduction of new metasurface

图 9 新棋盘式超表面的 RCS 以及 RCS 缩减

Fig. 9 RCS and RCS reduction of new metasurface

3 结束语

本文提出一种使用双谐振方法用于拓宽棋盘式超表面的 RCS 缩减带宽的方法, 可明显改善相位收敛的问题, 使单元结构 A#1 与 A#2 的反射相位差在很长频段内保持较为稳定的趋势, 从而拓宽棋盘式超表面的 RCS 缩减带宽。仿真结果显示, 方法实现了在 8 GHz~14.5 GHz 频带内基本达到 10 dB 及以上

的 RCS 缩减, 并能实现极化无关。将 A#1 单元改为 B#1 单元, B#1 与 A#2 组成新式棋盘式超表面, 其 RCS 缩减幅度比原超表面有了明显减低。

参考文献

- [1] CUI G, LIU Y, GONG S. A novel fractal patch antenna with low RCS[J]. *Journal of Electromagnetic Waves & Applications*, 2007, 21(15): 2403–2411.
- [2] PAN W, HUANG C, CHEN P, et al. A low-RCS and high-gain partially reflecting surface antenna[J]. *Antennas & Propagation IEEE Transactions on*, 2014, 62(2): 945–949.
- [3] 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.
- [4] CHANG K. Electromagnetic gradient surface and its application to flat reflector antennas[D]. Korea: Yonsei University, 2009.
- [5] SEO H P, KIM Y S, LIM Y. Improving phase continuity in electromagnetic gradient surface for large reflecting structures[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012: 1–2.
- [6] COS de M E, LVAREZ Á Y, LAS-HERAS F. On the influence of coupling AMC resonances for RCS reduction in the SHF band[J]. *Progress in Electromagnetic Research*, 2011, 117: 103–119.
- [7] COS de M E, LVAREZ Á Y, LAS-HERAS F. RCS reduction using a combination of artificial magnetic conductors[C]//*In Proc. 5th European Conf. Antennas and Propagation*, Rome, Italy, 2011: 1336–1340.
- [8] ZHANG Y, MITTRA R, WANG B Z, et al. AMCs for ultra-thin and broadband RAM design[J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(10): 484–485.
- [9] CHEN W, BALANIS C A, BIRTCHER C R. Checkerboard EBG surfaces for wideband radar cross section reduction[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(6): 2636–2645.
- [10] MIGHANI M, DADASHZADEH G. Broadband RCS reduction using a novel double layer chessboard AMC surface[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(14): 1253–1255.
- [11] IRIARTE G J C, TELLECHEA P A, MARTINEZ DE F J L, et al. Broadband radar cross-section reduction using AMC technology[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(12): 6136–6143.
- [12] ESMAELI S H, SEDIGHY S H. Wideband radar cross-section reduction by AMC[J]. *Electronics Letters*, 2015, 52(1): 70–71.
- [13] CHEN W, BALANIS C A, BIRTCHER C R. Dual wide-band checkerboard surfaces for radar cross section reduction[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(9): 4133–4138.
- [14] HAN Jiangfeng, CAO Xiangyu, GAO Jun, et al. Broadband radar cross section reduction using dual-circular polarization diffusion metasurfaces[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17, (6): 969–973.
- [15] SU Jianxun, CUI Yueyang, LI Zengrui, et al. Metasurface base on uneven layered fractal elements for ultra-wideband RCS reduction[J]. *AIP Advances* 8, 2018: 035027.
- [16] JIA Y T, LIU Y, GUO J, et al. A dual-patch polarization rotation reflective surface and its application to ultra-wideband RCS reduction[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(6): 3291–3295.
- [17] 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.
- [18] ZHANG Hui, LU Yao, SU Jianxun, et al. Coding diffusion metasurface for ultra-wideband RCS reduction[J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(3): 187–189.

[作者简介]

- 赵智明 1991 年生, 在读博士研究生, 主要研究方向为等离子体与超材料对电磁波调控机理研究。
李小平 1961 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为空间测控通信、空间科学及应用、智能通信及信息处理。
董果香 1986 年生, 博士, 讲师, 主要研究方向为人工电磁表面特性研究与天线设计。
赵良 1984 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为航天测控和通信系统。