

一种宽角域散射增强超表面的研究

丰茂昌 李勇峰 张介秋 王甲富 王超 马华 屈绍波

Research of a wide-angle backscattering enhancement metasurface

Feng Mao-Chang Li Yong-Feng Zhang Jie-Qiu Wang Jia-Fu Wang Chao Ma Hua Qu Shao-Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 198101 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181053

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181053>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I19>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于石墨烯编码超构材料的太赫兹波束多功能动态调控](#)

Dynamic multifunctional control of terahertz beam based on graphene coding metamaterial

物理学报.2018, 67(11): 118102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180125>

[空间盘绕型声学超材料的亚波长拓扑谷自旋态](#)

Subwavelength topological valley-spin states in the space-coiling acoustic metamaterials

物理学报.2017, 66(22): 228101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.228101>

[基于电阻型频率选择表面的宽带雷达超材料吸波体设计](#)

Design and fabrication of broadband radar metamaterial absorber based on the resistor FSS

物理学报.2015, 64(21): 218102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.218102>

[基于开口椭圆环的高效超宽带极化旋转超表面](#)

High-efficiency ultra-wideband polarization conversion metasurfaces based on split elliptical ring resonators

物理学报.2015, 64(17): 178101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.178101>

[基于编码超表面的太赫兹宽频段雷达散射截面缩减的研究](#)

A coding metasurfaces used for wideband radar cross section reduction in terahertz frequencies

物理学报.2015, 64(15): 158101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.158101>

## 一种宽角域散射增强超表面的研究\*

丰茂昌<sup>1)</sup> 李勇峰<sup>1)†</sup> 张介秋<sup>1)</sup> 王甲富<sup>1)</sup> 王超<sup>1)</sup> 马华<sup>1)</sup> 屈绍波<sup>1)‡</sup>

(空军工程大学基础部, 西安 710051)

(2018年5月29日收到; 2018年7月2日收到修改稿)

提出并验证了一种基于超表面相位梯度设计以实现宽角域后向雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 增强的设计思路. 宽角域 RCS 增强超表面包含两个区域, 分别设计大小相等方向相反的相位梯度, 控制  $-45^\circ$  和  $45^\circ$  方向上的入射电磁波沿入射方向返回; 电磁波垂直入射时, 在一个区域内耦合为表面电磁波, 传播至另一区域再次解耦为垂直反射的自由空间波, 分别在  $-45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  方向上形成散射峰, 实现了在  $-45^\circ-45^\circ$  的宽角域范围内的 RCS 增强. 仿真了宽角域 RCS 增强超表面在电磁波以不同角度入射时的电场分布和单站 RCS, 测试了加工样品在 9—12 GHz 频带内不同频点处的单站 RCS, 和仿真结果基本一致. 结果表明: 设计的宽角域 RCS 增强超表面在 9—12 GHz 的宽带频率范围内, 在  $-45^\circ-45^\circ$  的宽角域范围内对于  $x$  和  $y$  极化入射波均有良好的 RCS 增强效果.

**关键词:** 超表面, 相位梯度, 宽角域, 雷达散射截面增强**PACS:** 81.05.xj, 42.25.Fx, 41.20.Jb, 84.90.+a**DOI:** 10.7498/aps.67.20181053

## 1 引言

随着无线电通信系统的发展, 后向散射增强器件的应用越来越广泛. 在民用领域, 后向散射增强器件主要用于海上遇险救援和航道通航安全. 为了避免碰撞, 配备后向散射增强器件的救生艇和木船能够有效地增强自身的雷达散射截面 (radar cross section, RCS), 搜救人员能够及时发现并减少意外情况的发生. 在有暗礁、浅礁、沉船等意外事故频发的海域内放置后向散射增强器件, 可防止在特殊气象条件下船舶航行出现意外. 在军用领域, 后向散射增强器件主要作为伪装目标, 确保真实目标安全, 欺骗敌方, 提高己方目标的战场生存能力. 随着我国隐身战机的逐渐列装, 后向散射增强器件能够有效地增强隐身战机的 RCS, 有助于塔台引导其安全着陆. 此外, 装备有后向散射增强器件的导弹能够便于我方实时掌握导弹的飞行轨道.

传统的后向散射增强器件主要包括 Luneburg

透镜<sup>[1,2]</sup>和角反射器<sup>[3]</sup>. Luneburg 透镜能够在一定角域范围内提供较大的 RCS 值, 但是它一般由介质制成, 损耗较大且价格昂贵. 角反射器作为后向散射增强器件的典型结构, 其在实际应用中也有比较显著的缺点. 例如, 它一般都由金属材料制成, 导致其重量较重、体积较大. 目前, 随着对超表面研究的逐渐深入, 利用相位梯度超表面控制散射增强在近几年有着广泛的研究. 但是大多数研究都停留在单频点或单一角度的后向散射增强上<sup>[4]</sup>. 实现宽角域和宽频带的后向散射增强是目前研究的难点.

超表面<sup>[5-17]</sup>是具有亚波长厚度的二维超材料, 由二维亚波长或深亚波长结构单元阵列组成. 通过对亚波长结构单元透射或反射系数幅值和相位空间分布的调制可实现对透射或反射波束波阵面、极化方式、传播方向、传播模式等的自由调控. 因此其在微波元器件<sup>[18]</sup>、天线技术<sup>[19,20]</sup>、隐身技术<sup>[21,22]</sup>领域具有广阔的应用前景. 相位梯度超表面<sup>[23-26]</sup>是一种亚波长厚度的各向异性结构, 能使

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61501503, 61471388, 61331005) 和陕西省自然科学基金 (批准号: 2017JM6005) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liyf217130@126.com

‡ 通信作者. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn

入射电磁波发生相位突变. 通过引入相位梯度能够自由地调控反射波或透射波的传播方向.

针对相位梯度超表面对电磁波调控的巨大优势, 本文提出引入两个大小相等方向相反方向的相位梯度来实现在一定角域范围和一定带宽范围内的 RCS 增强. 为了得到需要的相位响应, 本文采用极化无关的耶路撒冷结构单元来设计相位梯度. 仿真和实验结果都验证了这种宽角域 RCS 增强超表面在  $-45^\circ-45^\circ$  角域范围内和 9—12 GHz 宽带频率范围内对于  $x$  和  $y$  极化波均有良好的 RCS 增强的效果.

## 2 宽角域 RCS 增强超表面设计

### 2.1 设计理论

如图 1(a) 所示, 二面角反射器是由两块形状和尺寸相同的平板相互垂直交叉而成的角型结构. 电磁波的入射角为  $\theta$ , 当入射角在  $-45^\circ < \theta < 45^\circ$  范围内时, 根据经典反射定律, 入射电磁波将经过两块平板的反射, 沿入射波的反方向回射. 当入射角  $\theta = \pm 45^\circ$  时, 入射波经过一块平板的反射方向依然沿入射波的反方向. 因此, 在  $-45^\circ-45^\circ$  的角域范围内能够有效地增强单站 RCS. 通过以上分析可以看出, 二面角反射器

是通过构造几何外形, 依据经典的反射理论来实现在  $-45^\circ-45^\circ$  角域范围内的单站 RCS 增强. 基于相位梯度超表面在调控反射波束波阵面的巨大优势, 我们引入相位梯度超表面来实现宽角域 RCS 增强, 如图 1(b) 所示. 根据广义反射定律, 对于入射角为  $45^\circ$  的电磁波,  $\mathbf{k}_i$  是入射波的波矢, 则它的面内波矢为  $\mathbf{k}_{ix} = \mathbf{k}_i \sin 45^\circ$ . 要使反射的电磁波沿入射波的相反的方向传播, 需要在  $x$  方向上引入相位梯度  $\nabla\Phi_x$ , 对入射波的面内波矢提供动量补偿, 从而改变反射波的传播方向. 为了使反射的电磁波沿入射波的相反方向传播, 需要补偿的面内波矢为  $\mathbf{k} = \nabla\Phi_x = -2\mathbf{k}_i \sin 45^\circ$ . 通过引入两个大小相等方向相反的相位梯度, 补偿面内波矢, 分别控制  $-45^\circ$  和  $45^\circ$  方向上的入射电磁波沿入射方向返回; 当电磁波垂直入射时, 由于此时面内补偿的波矢大于将电磁波耦合为表面波的附加波矢, 所以电磁波首先在一个区域内被耦合成表面电磁波. 当电磁波传播至另一区域时, 由于此时的相位梯度是反向的, 因此此时电磁波再次被解耦为垂直反射的自由空间波, 分别在  $-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ$  方向上形成散射峰, 实现了宽角域 RCS 增强的效果. 因此, 设计的宽角域 RCS 增强超表面在  $-45^\circ-45^\circ$  的角域范围内均有较好的 RCS 增强的效果.

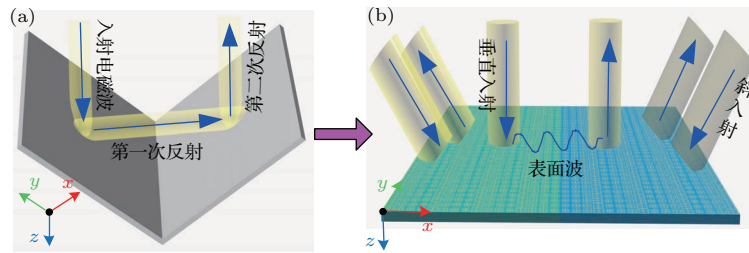


图 1 (a) 二面角角反射器示意图; (b) 宽角域 RCS 增强超表面示意图

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the dihedral corner reflector; (b) schematic diagram of the wide-angle RCS enhancement metasurface.

### 2.2 超表面结构单元设计

为了得到相应的相位梯度, 我们采用了经典的耶路撒冷结构来实现相应的相位响应. 如图 2(a) 所示, 用来设计相位梯度超表面的结构单元由三层组成, 最上层为金属耶路撒冷结构, 中间层为 F4B 介质基板 ( $\epsilon_r = 2.65, \tan(\delta) = 0.001$ ), 最下层为金属反射背板. 利用 CST Microwave Studio 软件, 优

化选择的结构单元的基本参数分别为  $p = 5.3 \text{ mm}$ ,  $d = 3 \text{ mm}$ ,  $a = (b - 0.45) \text{ mm}$ ,  $w = 0.2 \text{ mm}$ . 通过改变参数  $b$  的大小来改变电磁波以  $45^\circ$  角入射时的反射相位. 通过上面的理论分析, 为达到反射波沿入射波的相反方向传播的目的, 需要的相位响应分别为  $0^\circ, -45^\circ, -90^\circ, -270^\circ$ . 对应中心频点 10 GHz 处, 参数  $b$  的值分别为 3.06, 3.58, 3.92, 4.78 mm.

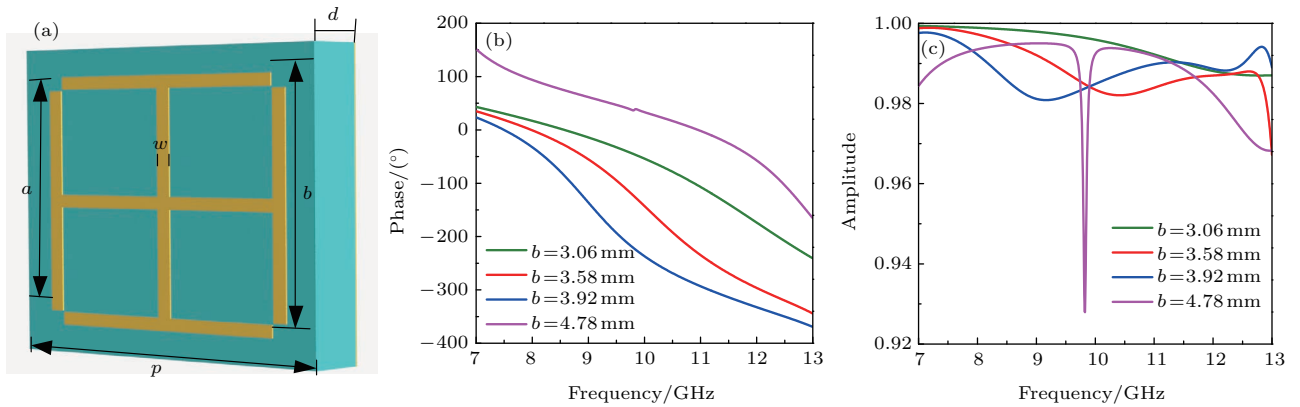


图2 (a) 耶路撒冷结构单元示意图; (b) 四种不同结构参数的反射相位仿真结果; (c) 四种不同结构参数的反射幅值仿真结果  
 Fig. 2. (a) Schematic diagram of the Jerusalem structural unit cell; (b) the reflection phase simulation results of four different structural parameters; (c) the reflection amplitude simulation results of four different structural parameters.

### 3 仿真验证

为了验证我们上面的设计思路, 将本文设计的宽角域RCS增强超表面利用电磁仿真软件CST Microwave Studio的频域求解器求解,  $x$ ,  $y$ , 和  $z$  方向均设置为“open add space”边界条件. 分别仿真  $y$  极化波和  $x$  极化波的单站RCS曲线.

如图3所示, 绿色曲线代表设计的宽角域RCS增强超表面的单站RCS仿真结果, 红色曲线代表等尺寸金属板的单站RCS仿真结果. 从仿真结果可以看出, 对于  $x$  和  $y$  两种极化的电磁波, 在9—12 GHz的宽带频率范围内, 本文设计的宽角域RCS增强超表面在  $-45^\circ$ — $45^\circ$  的角域范围内均有比较明显的RCS增强的效果. 从图3(b)可以看出, 在设计的中心频率  $f = 10$  GHz存在三个单站RCS增强的极大值点, 分别是  $-43^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $43^\circ$ . 这与本文前面理论设计的RCS增强的极大值点  $-45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , 存在少许的偏差. 主要原因在于仿真计算反射相位时采用的是周期性边界条件, 相邻单元之间都是同样尺寸的单元结构, 单元之间的耦合较强; 而当组成相位梯度时, 相邻单元之间都是不同尺寸的单元结构, 单元之间的耦合减弱, 因此, 实际的相位梯度与设计的相位梯度存在一定的偏差. 从图3(a)—(d)可以看出, 在9—12 GHz范围内对于  $x$  和  $y$  两种极化的电磁波, 在单站RCS增强的三个极大值点处均有大于18 dB的增强效果. 同时, 在  $-45^\circ$ — $45^\circ$  的角域范围内都有比较明显的RCS增强的效果.

为了进一步验证以不同入射角入射到宽角域RCS增强超表面上时反射波传播的主要方向, 分

别监视  $y$  极化波以入射角  $\theta = -43^\circ, 0^\circ, 43^\circ$  入射时, 宽角域RCS增强超表面在10 GHz处的三维后向远场散射图以及  $xoz$  平面内的电场分量分布  $E_y$ . 通过图4(a)—(c)可以看出, 当入射波分别以入射角  $\theta = -43^\circ, 0^\circ, 43^\circ$  入射时, 反射波的主要方向均沿入射波的相反的方向传播出来. 通过图5(a)和图5(c)可以看出, 当入射波的入射角分别为  $\theta = -43^\circ, 43^\circ$  时, 反射波的波阵面沿入射波的相反方向传播出来. 同时, 通过图5(b)可以看出, 当电磁波垂直入射时, 在一个区域内耦合为表面电磁波, 传播至另一区域再次解耦为垂直反射的自由空间波. 这与前面的理论分析是一致的.

### 4 实验验证

为了进一步验证我们设计的宽角域RCS增强超表面在  $-45^\circ$ — $45^\circ$  的角域范围内和9—12 GHz宽带频率范围内具有良好的RCS增强的效果. 采用平面印刷电路板技术加工制作了尺寸为  $254.4 \text{ mm} \times 259.7 \text{ mm}$  的宽角域RCS增强超表面的样品. 如图6(c)所示, 图中蓝色虚线的两侧分别由大小相等方向相反的相位梯度超单元组成. 图6(a)和图6(b)给出了测试RCS测试的暗室环境, 固定收发天线且处于相同的高度, 将样品固定, 保持垂直, 置于泡沫塔上并且垂直于收发天线. 通过旋转泡沫塔测试宽角域RCS增强超表面在  $-60^\circ$ — $60^\circ$  方位角的单站RCS. 固定样品底座不动, 将样品金属板背面朝向收发天线, 同样测量金属板在  $-60^\circ$ — $60^\circ$  方位角的单站RCS. 图7(a)—(d)给出了在  $x$  极化波入射的情况下, 宽角域RCS增强超表面

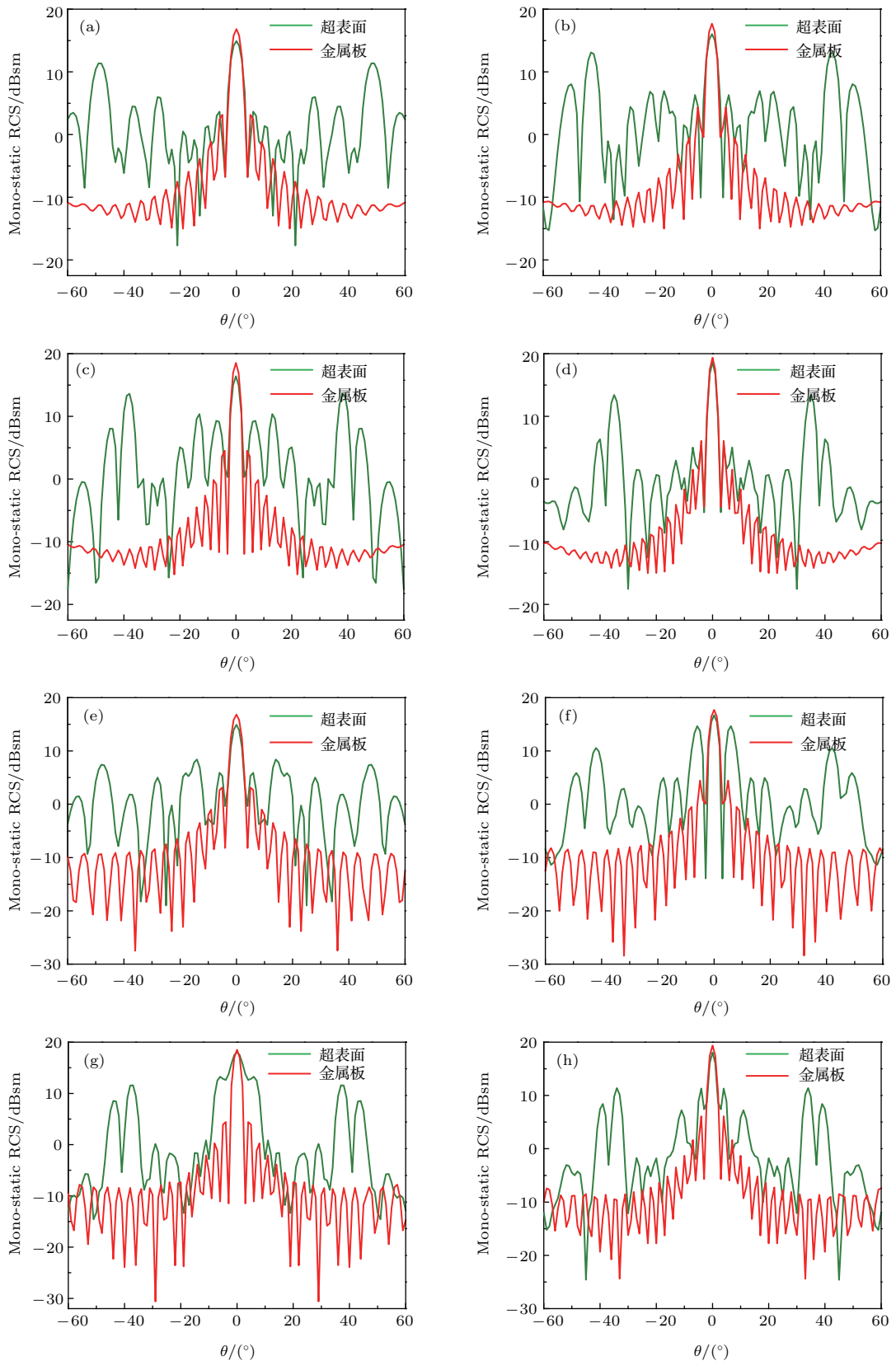


图3 (a)—(d) 在  $y$  极化波入射的情况下, 分别在 9, 10, 11 和 12 GHz 频点处的宽角域 RCS 增强超表面与等尺寸金属板的单站 RCS 仿真曲线对比; (e)—(h) 在  $x$  极化波入射的情况下, 分别在 9, 10, 11 和 12 GHz 频点处的宽角域 RCS 增强超表面与等尺寸金属板的单站 RCS 仿真曲线对比

Fig. 3. (a)–(d) Simulated mono-static RCS curves of wide-angle RCS enhancement metasurface and equal size metal plate for  $y$  polarized wave incidence at 9, 10, 11 and 12 GHz; (e)–(h) Simulated mono-static RCS curves of wide-angle RCS enhancement metasurface and equal size metal plate for  $x$  polarized wave incidence at 9, 10, 11 and 12 GHz.

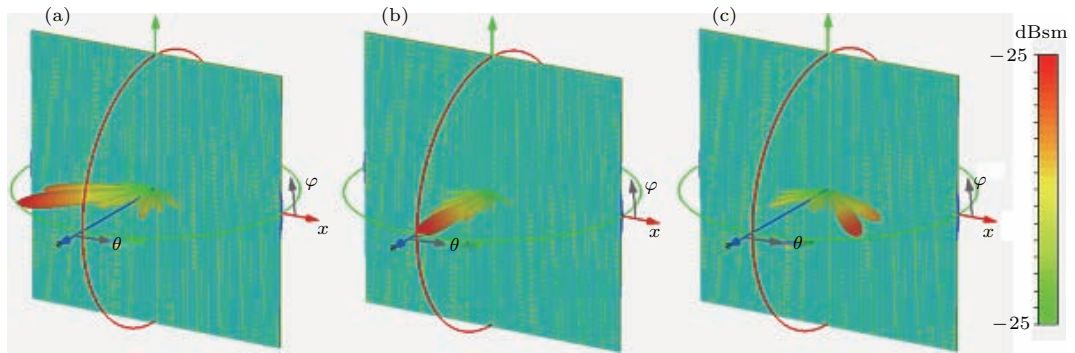


图4 (a)—(c)  $y$  极化波分别以入射角  $\theta = -43^\circ, 0^\circ, 43^\circ$  入射时, 宽角域 RCS 增强超表面在 10 GHz 处的三维后向远场散射图

Fig. 4. (a)–(c) Backward far-field patterns of the designed wide-angle RCS enhancement metasurface for  $y$  polarized wave incidence with the incidence angle  $\theta = -43^\circ, 0^\circ$ , and  $43^\circ$  at 10 GHz.

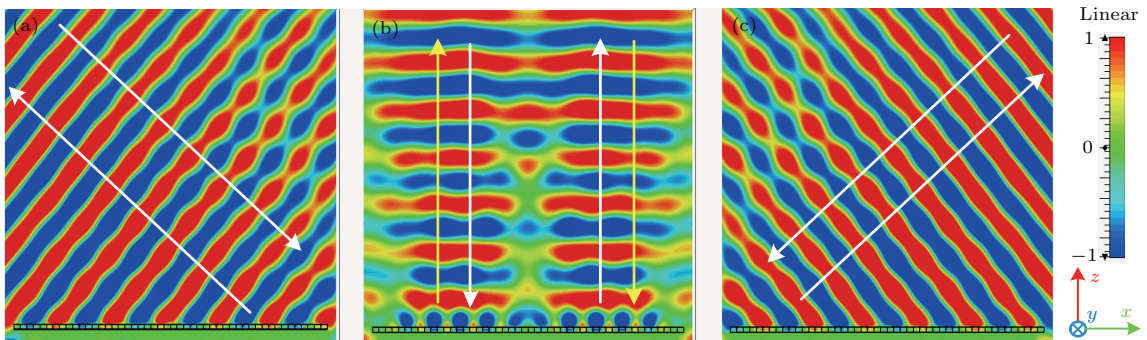


图5 (a)—(c)  $y$  极化波分别以入射角  $\theta = -43^\circ, 0^\circ, 43^\circ$  入射时, 宽角域 RCS 增强超表面在 10 GHz 处,  $xoz$  平面内的电场分量分布  $E_y$

Fig. 5. (a)–(c) The simulated distributions of the electric field components of the designed wide-angle RCS enhancement metasurface for  $y$  polarized wave incidence with the incidence angle  $\theta = -43^\circ, 0^\circ$ , and  $43^\circ$  at 10 GHz.

和等尺寸金属板分别在 9, 10, 11 和 12 GHz 频点处测试的单站 RCS 曲线对比. 通过与仿真结果对比可以发现金属板的单站 RCS 在  $0^\circ$  入射时比仿真结果小 3 dB 左右, 主要原因是由于固定样品的底座不能保证样品处于严格的竖直状态, 后向散射偏离入射方向. 同时, 测试的宽角域 RCS 增强超表面的单站 RCS 曲线也与仿真结果有少许的偏差, 主要原因有两个: 一是加工样品的 F4B 介质基板与仿

真基板的介电常数与损耗正切角有一定的偏差, 导致测试 RCS 增强的极值点对应的角度与仿真的有少许偏差; 二是固定样品时未能保证样品垂直于收发天线, 导致样品在入射角为  $0^\circ$  时, 后向散射偏离入射方向, 并没有出现仿真中的极值点. 整体来看, 实验结果与仿真结果基本符合, 验证了宽角域 RCS 增强超表面  $-45^\circ$ — $45^\circ$  的角域范围内良好的 RCS 增强效果.

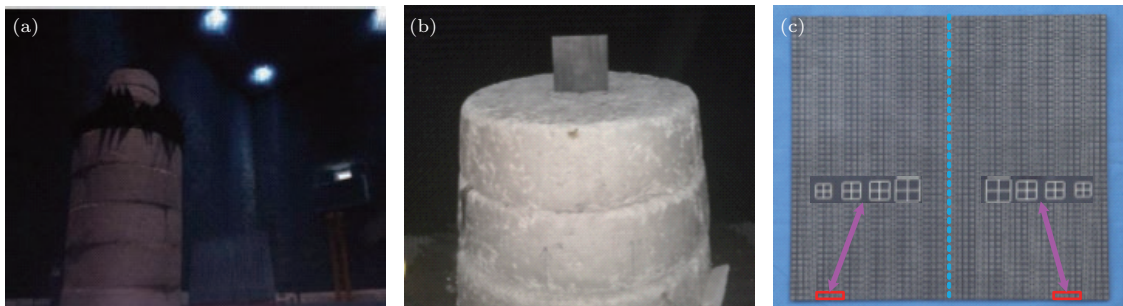


图6 (a) 微波暗室环境; (b) 固定宽角域 RCS 增强超表面样品; (c) 加工的宽角域 RCS 增强超表面样品照片, 其中插入的两张图片分别代表设计的两个大小相等方向相反的相位梯度超单元的细节放大图

Fig. 6. (a) Environment of anechoic chamber; (b) fixed the wide-angle RCS enhancement metasurface; (c) sample photograph of the designed wide-angle RCS enhancement metasurface, where the inserts are the zoom views presenting the detail information of different super-cells.

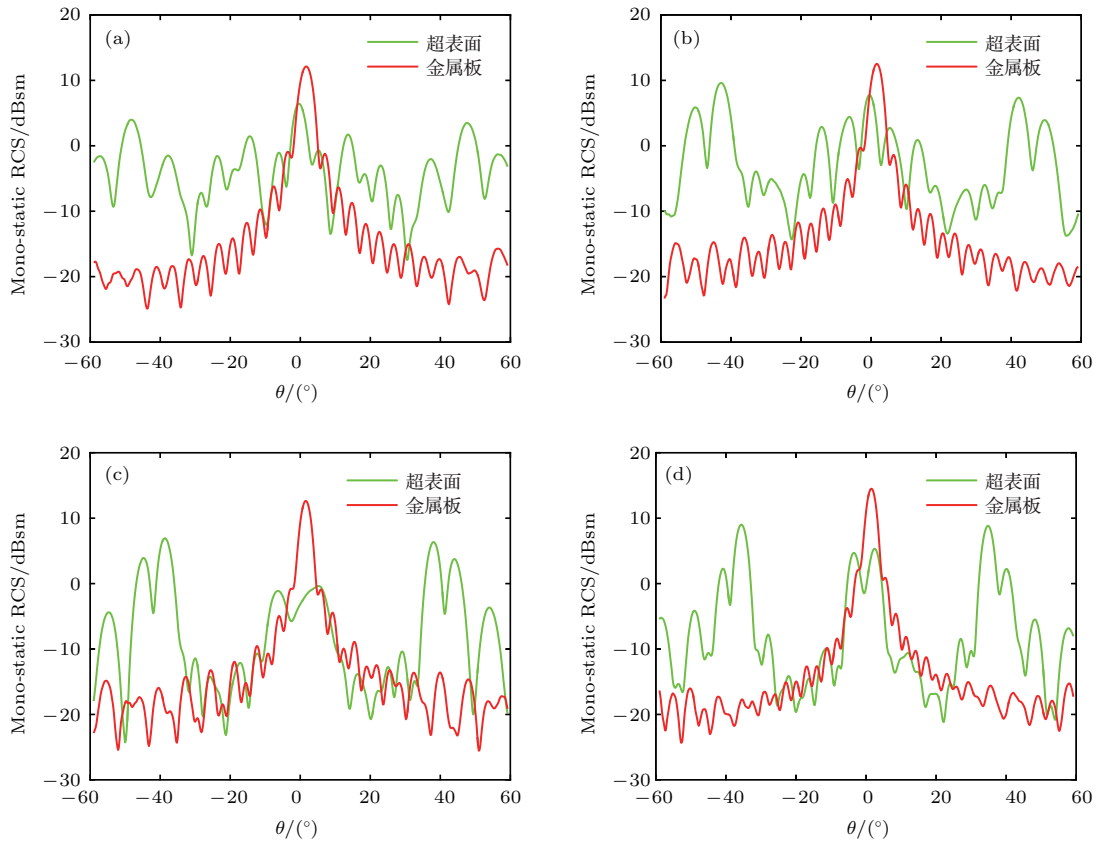


图7 (a)—(d) 在  $x$  极化波入射的情况下, 分别在 9, 10, 11 和 12 GHz 频点处的宽角域 RCS 增强超表面与等尺寸金属板的测试单站 RCS 曲线对比

Fig. 7. (a)–(d) Measured mono-static RCS curves of wide-angle RCS enhancement metasurface and equal size metal plate for  $x$  polarized wave incidence at 9, 10, 11 and 12 GHz.

## 5 结 论

本文提出并验证了通过引入两个大小相等方向相反的相位梯度综合调制, 实现了宽角域 RCS 增强. 仿真与实验结果都验证了在  $-45^\circ$ — $45^\circ$  的角域范围内和 9—12 GHz 宽带频率范围内设计的宽角域 RCS 增强超表面具有显著的 RCS 增强效果. 与传统的后向散射增强器件相比, 本文设计的宽角域 RCS 增强超表面具有 RCS 增强的角域范围可灵活设计、质量轻、厚度薄、体积小等优点.

## 参考文献

[1] Zentgraf T, Liu Y, Mikkelsen M H, Valentine J, Zhang X 2011 *Nat. Nanotechnol.* **6** 151  
 [2] Nikolic N, Kot J S, Vinogradov S 2007 *J. Electromagnet Wave* **21** 549  
 [3] Lipuma D, Meric S, Gillard R 2013 *Electron. Lett.* **49** 152  
 [4] Jia Y X, Wang J F, Li Y F, Pang Y Q, Yang J, Fan Y, Qu S B 2017 *AIP Adv.* **7** 105315

[5] Yu N F, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333  
 [6] Lin D, Fan P, Hasman E, Brongersma M L 2014 *Science* **345** 298  
 [7] Ni X, Kildishev A V, Shalaev V M 2013 *Nat. Commun.* **4** 2807  
 [8] Achouri K, Salem M A, Caloz C 2015 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **63** 2977  
 [9] Li Y, Assouar B M 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 063502  
 [10] Liu Y, Ling X, Yi X, Zhou X, Luo H, Wen S 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 191110  
 [11] Pfeiffer C, Grbic A 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 197401  
 [12] Sun Y Y, Han L, Shi X Y, Wang Z N, Liu D H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104201 (in Chinese) [孙彦彦, 韩璐, 史晓玉, 王兆娜, 刘大禾 2013 物理学报 **62** 104201]  
 [13] Deng Z L, Zhang S, Wang G P 2016 *Nanoscale* **8** 1588  
 [14] Deng Z L, Li G 2017 *Mater. Today Phys.* **3** 16  
 [15] Deng Z L, Deng J H, Zhuang X, Wang S, Li K F, Wang Y, Chi Y H, Ye X, Xu J, Wang G P, Zhao R K, Wang X L, Cao Y Y, Cheng X, Li G X, Li X P 2018 *Nano Lett.* **18** 2885  
 [16] Deng Z L, Zhang S, Wang G P 2016 *Opt. Express* **24** 23118  
 [17] Deng Z L, Cao Y Y, Li X P, Wang G P 2018 *Photon. Res.* **6** 443

- [18] Wan X, Shen X, Luo Y, Cui T J 2014 *Laser Photon. Rev.* **8** 757
- [19] Xu H X, Wang G M, Liang J G, Qi M Q, Gao X 2013 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **61** 3442
- [20] Badawe M E, Almoneef T S, Ramahi O M 2016 *Sci. Rep.* **6** 19268
- [21] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Chen H Y, Xu Z, Zhang A X 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 221110
- [22] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Chen H Y, Xu Z, Zhang A X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 084103 (in Chinese) [李勇峰, 张介秋, 屈绍波, 王甲富, 陈红雅, 徐卓, 张安学 2014 物理学报 **63** 084103]
- [23] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Chen H Y, Zhen L, Xu Z, Zhang A X 2014 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47** 425103
- [24] Wang J F, Qu S B, Ma H, Xu Z, Zhang A X, Zhou H, Chen H Y, Li Y F 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 201104
- [25] Langguth L, Schokker A H, Guo K, Koenderink A F 2015 *Phys. Rev. B* **92** 205401
- [26] Zheng Q Q, Li Y F, Zhang J Q, Ma H, Wang J F, Pang Y Q, Han Y J, Sui S, Shen Y, Chen H Y, Qu S B 2017 *Sci. Rep.* **7** 43543

# Research of a wide-angle backscattering enhancement metasurface\*

Feng Mao-Chang Li Yong-Feng<sup>†</sup> Zhang Jie-Qiu Wang Jia-Fu  
Wang Chao Ma Hua Qu Shao-Bo<sup>‡</sup>

(Department of Basic Sciences Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

( Received 29 May 2018; revised manuscript received 2 July 2018 )

## Abstract

To enhance backscattering, corner reflector and Luneburg lens are usually used. They can operate effectively in a broad angle range and also in a quite wide band. However, corner reflector as a typical structure of backscattering enhancement device, has obvious disadvantages in practical application. For example, it is usually made of metal material, which causes it to be too heavy and bulky. Luneburg lens is generally made of dielectric with strong loss and high cost, which is unfavorable for applications. Thus, it is necessary to explore a new way to realize wide-angle backscattering enhancement. In this paper, a phase gradient metasurface with wide-angle radar cross section (RCS) enhancement property is proposed and demonstrated, which consists of two phase gradients with equal magnitude but in opposite directions. Through designing a reflective phase profile along the surface, an equivalent wave vector can be generated, with doubled magnitude but in an opposite direction to the parallel component of the wave vector of the incident wave. At the incidence angles  $\theta = -45^\circ$  and  $45^\circ$ , electromagnetic (EM) waves are reflected to the directions just opposite to the directions of incident waves. And at incidence angle  $\theta = 0^\circ$ , the incident EM wave is coupled into spoof surface wave and then guided to another region to decouple into a free space wave. These guarantee RCS enhancement property in a related angular domain. The polarization independent Jerusalem cross unit is used to design the phase gradient, and a wide-angle RCS enhancement metasurface is designed. The simulated results indicate that at the designed incidence angles, directions of the reflected waves are all opposite to the directions of incidence waves for both  $x$  and  $y$  polarized wave. In order to evaluate the RCS enhancement performances, the mono-static RCS of the designed wide-angle RCS enhancement metasurface is measured. Both the simulations and experiments are in good agreement with each other, and show that the designed metasurface obtains tremendous RCS enhancement performances in a wide-angle domain ( $-45^\circ$ – $45^\circ$ ) for both  $x$  and  $y$  polarized wave with frequencies ranging from 9 GHz to 12 GHz.

**Keywords:** metasurface, phase gradient, wide-angle, radar cross section enhancement

**PACS:** 81.05.xj, 42.25.Fx, 41.20.Jb, 84.90.+a

**DOI:** 10.7498/aps.67.20181053

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61501503, 61471388, 61331005) and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2017JM6005).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [liyf217130@126.com](mailto:liyf217130@126.com)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [qushaobo@mail.xjtu.edu.cn](mailto:qushaobo@mail.xjtu.edu.cn)