

# 宽频带雷达散射截面缩减相位梯度超表面的设计及实验验证\*

李勇峰<sup>1)</sup> 张介秋<sup>1)†</sup> 屈绍波<sup>1)</sup> 王甲富<sup>1)</sup>  
陈红雅<sup>1)</sup> 徐卓<sup>2)</sup> 张安学<sup>3)</sup>

1)(空军工程大学理学院, 西安 710051)

2)(西安交通大学, 电子陶瓷与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

3)(西安交通大学电子信息工程学院, 西安 710049)

(2013年11月27日收到; 2014年1月24日收到修改稿)

针对相位梯度超表面在隐身技术中的应用, 提出通过表面波耦合和异常反射两种机制复合实现宽频带后向雷达散射截面(RCS)缩减. 采用开口谐振环进行相位梯度设计, 实现了一种二维极化无关相位梯度超表面, 在10 GHz附近, 超表面通过将垂直入射电磁波耦合为表面波实现RCS缩减, 而在大于11 GHz的频率范围内, 相位分布的不均匀性使垂直入射的电磁波发生漫反射或者异常反射, 降低后向RCS. 制作了厚度为2 mm的超表面样品, 测试了其反射率曲线和后向RCS, 并与相同尺寸的金属板进行了对比. 实验结果表明, 在宽频段内(9.5—17.0 GHz), 超表面在垂直入射情况下可将后向RCS缩减至少10 dB. 由于厚度薄、重量轻、频带宽, RCS缩减超表面在隐身新材料和新技术方面具有很大的应用潜力.

**关键词:** 雷达散射截面, 超表面, 表面波, 异常反射

**PACS:** 41.20.Jb, 73.20.Mf, 77.22.-d, 84.90.+a

**DOI:** 10.7498/aps.63.084103

## 1 引言

相位梯度超表面<sup>[1-11]</sup>是一种亚波长厚度的各向异性结构, 能使入射电磁波发生相位突变, 在其表面方向上产生相位梯度, 以此来控制反射波或透射波束的传播方向. 传统的光学元件(平面镜、棱镜、透镜<sup>[12,13]</sup>等)及衍射结构(光栅等)均是通过传播路径上连续相位的积累来改变波束的传播方向, 波在光学元件中传播的距离一般远大于波长. 当电磁波入射到两种介质的分界面上时, 反射波和透射波遵守经典的反射定律和折射定律(斯涅尔定律, Snell's Law). 超材料尤其是左手材料<sup>[14-18]</sup>的研究表明, 使用左手材料也可使入射波发生异常反射, 但其仍然遵循经典折射定律, 只是引入了负的

折射率. 相比之下, 相位梯度超表面在界面不同位置引入不同的相位突变, 通过对这些相位突变进行精心设计, 可控制反射波束和折射波束的方向, 电磁波传播不再遵守经典的反射定律和折射定律, 而是遵守广义反射定律和广义折射定律<sup>[1,2]</sup>. 这样, 通过亚波长厚度的相位梯度超表面可实现对反射波和透射波传播方向的自由控制, 极大地减小了光学器件的厚度和体积.

相位梯度超表面自其首次被提出后, 就受到了国内外学术界的广泛关注. 哈佛大学Yu等<sup>[1]</sup>使用V形结构在光波段成功实现了相位梯度超表面, 使透射波发生异常反射, 通过二维相位梯度超表面实现了涡旋波阵面. 在后续研究中, 研究者们相继设计实现了相位梯度超薄平板透镜和微波频段相位

\* 国家自然科学基金(批准号: 61331005, 11204378, 11274389, 11304393, 61302023)、中国博士后科学基金(批准号: 2013M532131, 2013M532221)和陕西省基础研究计划(批准号: 2011JQ8031, 2013JM6005)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhangjq0@163.com

梯度表面等<sup>[9-11]</sup>. 复旦大学周磊教授课题组<sup>[10]</sup>采用H型结构设计实现了反射型相位梯度超表面,在特定极化状态下,可在宽频带内实现电磁波的异常反射. 空军工程大学屈绍波教授课题组<sup>[11]</sup>采用开口谐振环(split ring resonator, SRR)设计了反射型相位梯度超表面,可将特定极化入射电磁波高效耦合为表面电磁波<sup>[19-24]</sup>. 可见,相位梯度超表面可将入射电磁波耦合为表面波或使入射电磁波的反射方向发生偏折,具有不同于传统材料表面的散射特性,在隐身技术中具有重要的应用价值.

针对相位梯度超表面在隐身技术中的应用,本

文提出通过表面波耦合和异常反射两种机制复合实现宽频带后向雷达散射截面(RCS)缩减,并采用超材料经典结构单元——开口谐振环结构,设计制作了一种二维极化无关相位梯度超表面. 在垂直入射情况下,在低频段通过将入射电磁波耦合为表面波实现后向RCS缩减,而在高频段利用相位分布的不均匀性形成异常反射或漫反射,降低后向RCS. 通过这两种机制复合,实现了在宽频带内减小目标的后向RCS. 仿真和实验结果验证了这种超表面的宽频段RCS缩减性能.

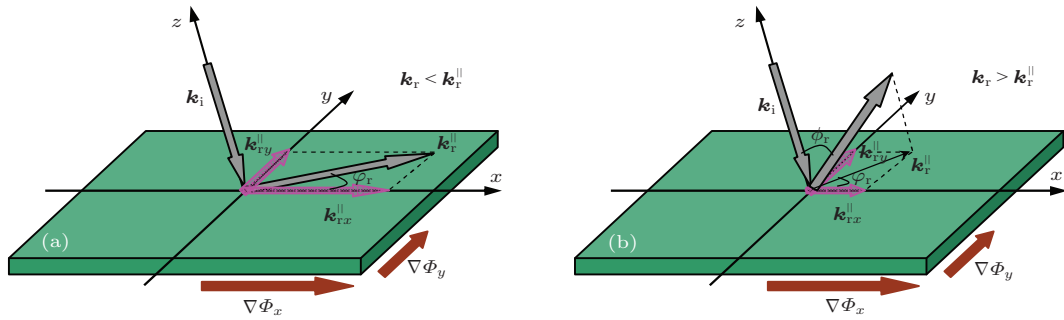


图1 超表面设计原理示意图 (a) 表面波激发; (b) 异常反射

## 2 超表面设计

### 2.1 设计原理

假设一束电磁波垂直入射到如图1所示的二维相位梯度超表面上,  $\mathbf{k}_i$  是入射波空间波矢, 电磁波空间波矢量面内投影为零, 即面内波矢为零,  $\mathbf{k}_i = \mathbf{k}_z$ . 在中心频率附近的频率范围内, 二维超表面上不同位置的反射相位不同, 分别在  $x$  和  $y$  方向上引入了相位梯度  $\nabla\Phi_x$ ,  $\nabla\Phi_y$ , 可以对入射波的面内波矢提供动量补偿, 使反射波的面内波矢量不再等于入射波的面内波矢量, 从而改变反射波的传播方向. 动量补偿后反射波的面内波矢

$$\mathbf{k}_r^{\parallel} = \hat{x}k_{rx} + \hat{y}k_{ry}, \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{k}_r^{\parallel}$  是反射波的面内波矢,  $k_{rx} = \nabla\Phi_x$ ,  $k_{ry} = \nabla\Phi_y$ . 因此, 反射波空间波矢  $\mathbf{k}_r$  为

$$\mathbf{k}_r = \mathbf{k}_r^{\parallel} + \mathbf{k}_{rz} = \hat{x}k_{rx} + \hat{y}k_{ry} + \hat{z}k_{rz}. \quad (2)$$

根据动量守恒原理,  $\mathbf{k}_r = \mathbf{k}_i$ , 因此, 可以得出

1) 当  $\mathbf{k}_r^{\parallel} < \mathbf{k}_i$  时, 入射波被异常反射, 异常反

射角为

$$\theta_r = \arcsin\left(\frac{\sqrt{\nabla\Phi_x^2 + \nabla\Phi_y^2}}{k_i}\right); \quad (3)$$

2) 当  $\mathbf{k}_r^{\parallel} > \mathbf{k}_i$  时, 出现零反射, 入射波被耦合为超表面上沿面内波矢方向传播的表面波, 面内波矢方向角度  $\varphi_r$  为

$$\varphi_r = \arctan\left(\frac{\nabla\Phi_y}{\nabla\Phi_x}\right). \quad (4)$$

### 2.2 超表面单元结构设计

图2给出了用来设计相位梯度超表面的SRR结构单元示意图, 整个单元由三层组成, 单元周期为  $a$ , 最下层为金属背板, 中间层为FR4介质基板 ( $\epsilon_r = 4.3$ ,  $\tan\delta = 0.0025$ ), 厚度为  $d$ , 最上层为金属SRR组合结构, 厚度为  $t$ .

当电磁波垂直入射到上述不同结构参数的周期性SRR单元结构上时, 反射波相对于入射波具有不同的相位突变, 通过设计使  $x$  和  $y$  方向上相邻结构单元之间的相位差分别为  $\Delta\Phi_x$ ,  $\Delta\Phi_y$ , 可分别在  $x$  方向和  $y$  方向形成针对电磁波垂直入射的相位梯度  $\nabla\Phi_x = \Delta\Phi_x/a$ ,  $\nabla\Phi_y = \Delta\Phi_y/a$ . 通过

优化选择  $a = 5 \text{ mm}$ ,  $w = 0.2 \text{ mm}$ ,  $s = 0.2 \text{ mm}$ ,  $w_1 = 0.2 \text{ mm}$ ,  $d = 2 \text{ mm}$ ,  $t = 0.017 \text{ mm}$ ,  $l = (b - 1.3)/2$ . 通过改变  $b$  的大小来改变电磁波垂直入射时的反射相位. 将不同结构参数的单元结构利用 CST Microwave Studio 的频域求解器计算其反射相位, 边界条件设为 unit cell, 在中心频点  $f = 10 \text{ GHz}$  处, 根据图 3 所示  $x$  和  $y$  方向上的相位梯度设计, 选择 36 个不同结构尺寸的结构单元, 组成如图 4 所示的二维超表面“超单元”. 此“超单元”在  $x$  方向上相邻单元之间的相

位差为  $-\pi/2$ ,  $y$  方向上的相邻单元之间的相位差为  $\pi/6$ . 在进行相位梯度设计的过程中, 如果  $x$  和  $y$  方向设计为相同大小的相位梯度, 则  $x$  和  $y$  方向上的相位分布区间均可涵盖  $[0, 2\pi]$ . 但设计“超单元”只需要 11 个不同尺寸的单元结构, 而在发生漫反射的频率范围内, 使用的不同尺寸的单元结构个数越多效果越好. 因此为了增加不同尺寸单元结构的个数, 我们设计的相位梯度在  $x$  和  $y$  方向上不同, 从而增加至 36 个不同尺寸的单元结构, 增强了漫反射效应, 可以进一步拓展 RCS 缩减带宽.

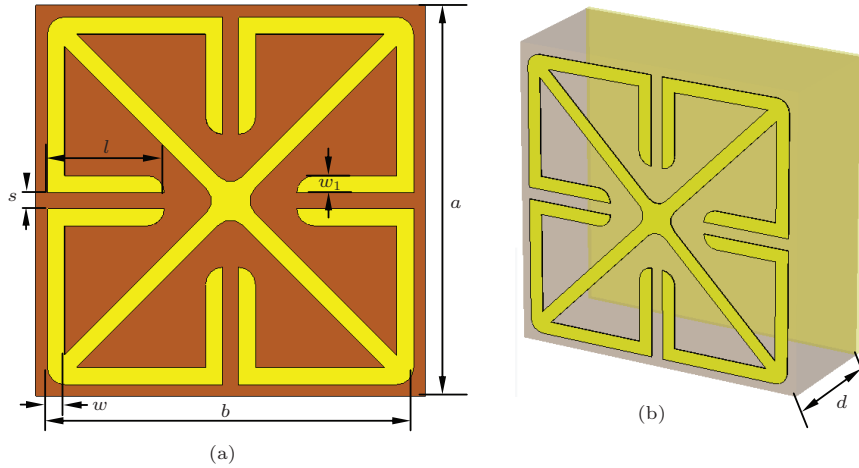


图 2 开口谐振环组合结构单元示意图 (a) 正视图; (b) 侧视图

### 3 仿真与实验验证

#### 3.1 仿真

将本文设计的相位梯度超表面的“超单元”结构利用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 的频域求解器求解,  $x$  和  $y$  方向为 unit cell 边界,  $z$  方向上边界设为 open and space, 分别仿真横电 (TE) 波, 横磁 (TM) 波垂直入射的反射率, 仿真结果如图 5 所示. 从图中可以看出, 对于两种极化的垂直入射波, 在设计中心频率  $f = 10 \text{ GHz}$  处均存在一个反射低谷, 对应一个吸收峰, 此时, 入射波被高效地耦合为表面波, 反射率降低. 但对于两种极化的入射波, 其反射率最小值所在频率相对于中心频率均有微小的偏移, 主要由于计算反射相位时使用周期边界条件, 单元之间的耦合较强; 而组成相位梯度超表面之后, 相邻单元的结构尺寸不同, 它们相对于计算反射相位时周期单元之间的耦合减弱, 因此, 实际相位梯度与设计的相位梯度存在一定的偏差. 从反射率曲线可以看出, 在中心频点附近,

10 dB 带宽约等于 1 GHz. 在  $f > 11 \text{ GHz}$  的频率范围内, 由于所设计的二维超表面单元结构中相邻小单元之间的相位差不再相等,  $x$  和  $y$  方向不存在惟一的相位梯度, 因而产生异常反射或者漫反射, 造成镜面反射率下降.

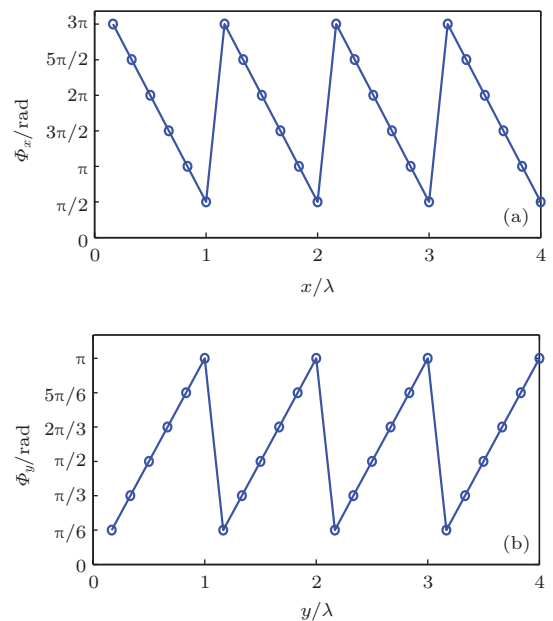


图 3 超表面相位梯度设计

图6所示为9 GHz <math>f</math> <math>17</math> GHz 频率范围内平面波垂直入射条件下超表面单个“超单元”  $xoz$  面内 ( $\varphi = 0^\circ$ ) 的远场散射方向, 平面波入射方向对应  $\theta = 0^\circ$ , 横坐标为频率, 纵坐标对应反射方向, 图中的颜色深度为RCS, 单位为 dBsm, 反映了相应频率和散射方向上的散射强度. 随着颜色由深至浅, RCS 逐渐增大. 从图中可以看出, 在整个频率范围内, 散射最强的方向均不在  $0^\circ$  方向. 在  $f < 15$  GHz 的频率范围内, 散射最强的方向在  $10^\circ < \theta < 20^\circ$  的范围内, 同时也是最强反射波的出射方向; 而在  $f > 15$  GHz 的频率范围内, 散射最强的方向在  $-20^\circ < \theta < -10^\circ$  的范围内, 即反射波偏离了入射方向. 特别地, 在散射方向为  $\theta = 0^\circ$  时, 散射最弱的频率位置在  $f = 10$  GHz, 而且在  $f = 10$  GHz 附近, 整个散射方向上的散射强度均比较弱, 未出现散射最大的方向, 这是由于在  $f = 10$  GHz 的频率附近, 入射波耦合为表面波, 出现了零反射; 而在其余频率范围内入射波被异常反射和漫反射. 因此, “超单元”远场散射方向图的仿真结果进一步验证了我们的设计思想, 即基于表面波耦合和异常反射两种机制最终实现 RCS 的宽带缩减.

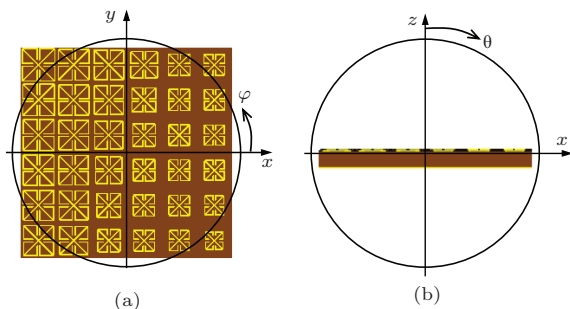


图4 超表面“超单元”结构示意图 (a) 正视图; (b) 侧视图

### 3.2 反射率测试

根据上面的设计, 利用平面印刷电路板技术加工制作了尺寸为 420 mm × 420 mm 的测试样品, 如图7所示, 其中的插图为单个“超单元”结构放大图. 采用厚度为  $d = 2$  mm 的FR4 基板, 金属表面镀锡以防止因金属氧化影响实验结果. 分别测试 TE, TM 极化电磁波垂直入射时的反射率曲线, 如图8所示. TE, TM波垂直入射时的反射最小值对应的中心频点分别在  $f = 9.82$  GHz 和  $f = 10.5$  GHz, 与仿真结果基本一致; TM入射波对应的测试结果相对于仿真结果向高频偏移了 0.5 GHz, 主要由于实际的FR4 基板介电常数和损

耗与仿真采用的材料参数有一定的偏差. 从反射率曲线可以看出, 在中心频点附近, 10 dB 带宽约等于 1 GHz, 而在 11 GHz <math>f</math> <math>15</math> GHz 的频率范围内, 由于  $x$  和  $y$  方向上各相邻单元结构之间的相位差不相等且随频率变化, 因此超表面对入射波发生异常反射和漫反射, 从而导致在 11—15 GHz 频率范围内的反射率降低, 基本在 -5 dB 以下.

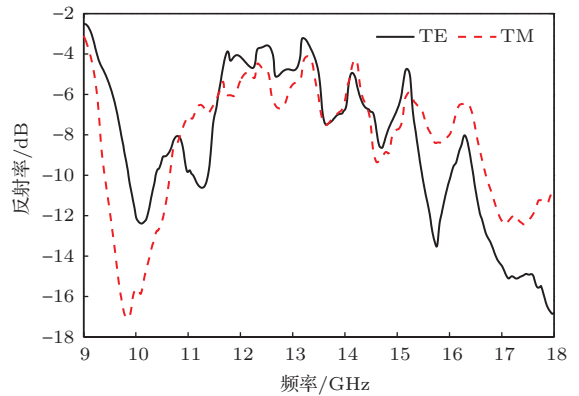


图5 反射率仿真结果

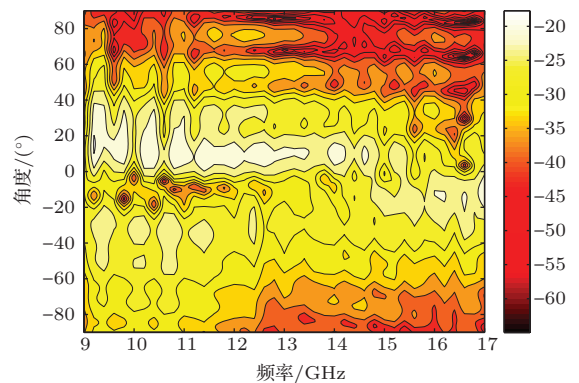


图6 (网刊彩色) 平面波垂直入射 ( $\theta = 0^\circ$ ) 条件下“超单元”的远场散射方向图

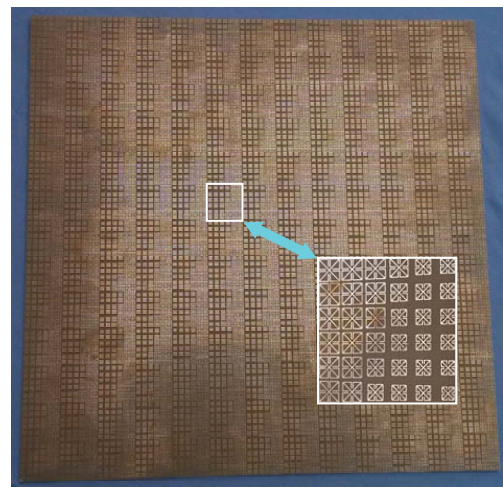


图7 超表面样品

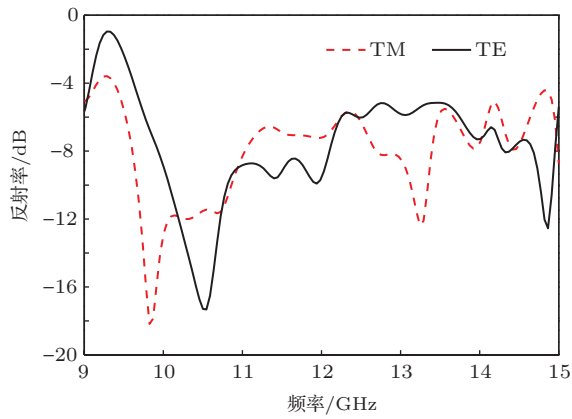


图8 反射率测试曲线

### 3.3 RCS测试

图9(a)给出了RCS测试的暗室环境. 搭建泡沫塔, 测试样品置于散射泡沫塔上, 用泡沫底座固定样品使其保持竖直, 如图9(b)所示. 收发天线固定且处于同一高度, 通过旋转泡沫塔改变入射角度, 超表面样品垂直于收发天线放置, 测试样品在 $-90^{\circ}$ — $90^{\circ}$ 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, 测量金属板在 $-90^{\circ}$ — $90^{\circ}$ 方位角的单站RCS. 图10为 $f = 10, 17$  GHz时超表面和金属背板的单站RCS对比曲线. 由于放置样品时未与收发天线保持垂直, 测量的RCS最大值对应的角度在 $-0.8^{\circ}$ , 由此可知样品放置的初始位置对应的入射角为 $-0.8^{\circ}$ . 根据金属正方形平板的RCS计算公式 $\sigma = 4\pi L^4/\lambda^2$ , 其中 $L$ 为金属正方形平板的边长,  $\lambda$ 为工作波长, 计算 $420\text{ mm} \times 420\text{ mm}$ 的金属板在 $f = 10$  GHz的RCS大小为 $26.3796\text{ dBsm}$ ,  $f = 17$  GHz时的RCS理论计算值为 $30.989\text{ dBsm}$ . 不难看出, 在整个频率范围内, RCS测量值比理论计算值小3—4 dBsm, 主要是由于固定样品的底座未能保证样品严格处于竖直状态, 后向散射偏离入射方向, 但由于超表面和金属板使用同一泡沫底座固定, 它们偏离竖直方向的角度相同, 因此, 超表面的RCS测试结果相比于其实际值同样有3—4 dBsm的偏差, 因而测试结果同样具有意义. 从图中 $f = 10, 17$  GHz的RCS测试结果来看, 超表面结构对于电磁波小角度( $-20^{\circ} < \theta < 20^{\circ}$ )入射时的RCS缩减具有很好的效果.

图11给出了在9—17 GHz频段内垂直入射时金属板和超表面的后向散射测试结果对比, 图12是垂直入射时超表面相对于同尺寸金属板的

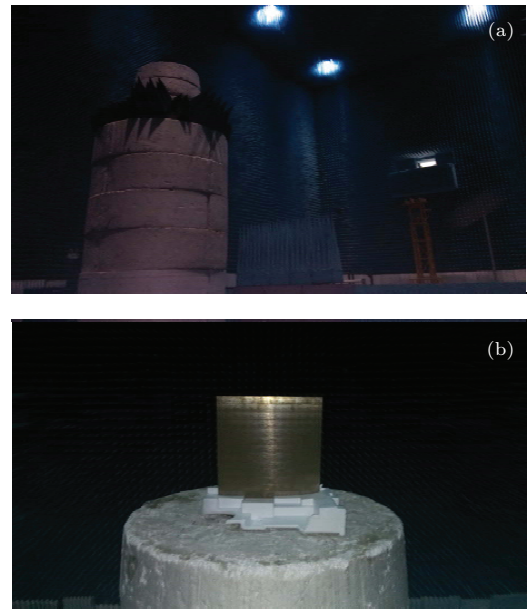


图9 RCS测试平台 (a) 暗室环境; (b) 样品固定

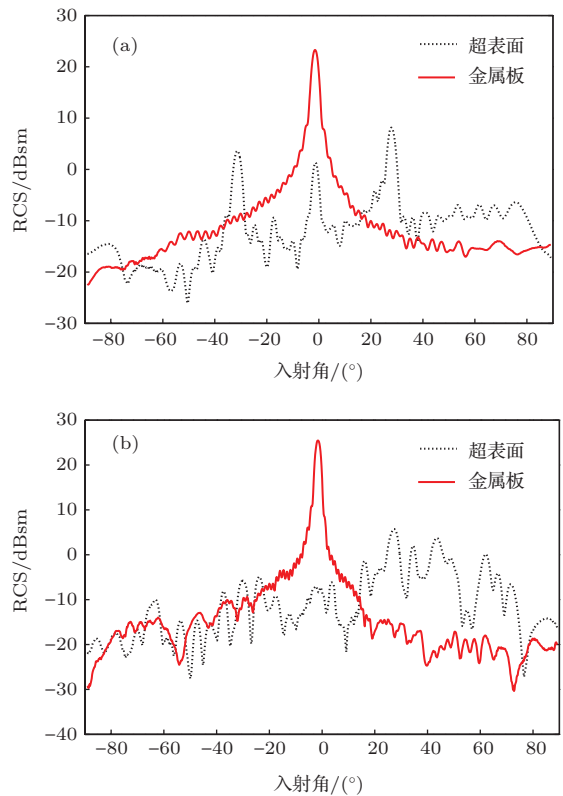


图10 RCS测试曲线 (a)  $f = 10$  GHz; (b)  $f = 17$  GHz

RCS缩减量. 从图中可以看出, 对于 $0^{\circ}$ 入射方向的RCS, 超表面相比于金属板的减小量基本都在10 dB以上, 而且具有宽带特性, 实际测试中最高频率只测到17 GHz, 17 GHz以上的频段理论上对于RCS缩减仍有效果. 在以 $f = 10$  GHz为中心频率的频段内, 设计的相位梯度表面可以将垂直入射的电磁波耦合为沿表面传播的表面波, 出现零反

射,因此在10 GHz附近产生一个RCS缩减量极大值点.在 $f = 10$  GHz, RCS缩减了17 dBsm.而在大于11 GHz的频带内,组成超表面“超单元”的各相邻小单元的反射相位差不相等, $x$ 与 $y$ 方向的相位梯度不再是常值,且随频率变化,这时垂直入射的电磁波被超表面异常反射甚至形成无规律的漫反射,从而降低垂直入射时的后向散射,也能达到缩减RCS的目的,如在测试结果中 $f = 17$  GHz时,RCS缩减量达到了30 dB.

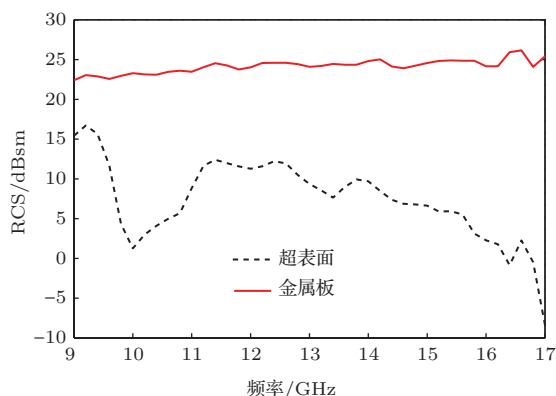


图11  $0^\circ$ 入射时超表面和金属板的RCS测试结果对比

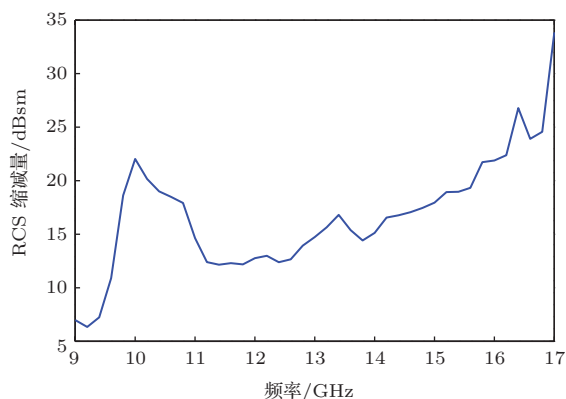


图12  $0^\circ$ 入射时超表面相对于同尺寸金属板的RCS缩减量

## 4 结 论

本文提出通过两种机制来减小超表面的后向散射,并设计制作了一种二维相位梯度超表面对这种后向散射抑制方法进行验证.在 $f = 10$  GHz附近,通过相位梯度设计,使得垂直入射的电磁波耦合为在超表面内传播的表面波,在传播的过程中通过金属和介质损耗衰减为零.在 $f > 11$  GHz的频率范围内,由于 $x$ 和 $y$ 方向上存在着不惟一的相位梯度而对垂直入射波产生异常反射或者漫反射.文中仿真了电磁波垂直入射至超表面

的反射率,制作了样品,测试了其反射率曲线,测试结果与仿真结果基本一致;测试超表面和相同尺寸金属板的单站后向散射,通过对比,在 $9.5 \text{ GHz} < f < 17 \text{ GHz}$ 频率范围内,超表面相对于金属板均有至少10 dBsm的RCS缩减量.这种超表面具有质量轻、厚度薄、极化无关等特性,是一种有效的宽带后向RCS缩减结构,在隐身技术中具有一定的应用前景.

## 参考文献

- [1] Yu N, Genevet P, Kats A M, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [2] Aieta F, Genevet P, Yu N, Kats A M, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Nano Lett.* **12** 1702
- [3] Wei Z Y, Cao Y, Su X P, Gong Z J, Long Y, Li H Q 2013 *Opt. Express* **21** 010739
- [4] 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]
- [5] Ni X, Emani N K, Kildishev A V, Boltasseva A, Shalae V M 2012 *Science* **335** 427
- [6] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, Zeng Y, Reiten M T, Azad A K, Taylor A J, Dalvit D A R, Chen H T 2013 *Science* **340** 1304
- [7] Nader Engheta N 2011 *Science* **334** 317
- [8] Farmahini-Farahani M, Mosallaei H 2013 *Opt. Lett.* **38** 462
- [9] Pfeiffer C, Grbic A 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 197401
- [10] Sun S L, He Q, Xiao S Y, Xu Q, Li X, Zhou L 2012 *Nature Mater.* **11** 426
- [11] 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
- [12] Pinchuk A O, Schatz G C 2007 *J. Opt. Soc. Am.* **24**
- [13] Paul O, Reinhard B, Krolla B, Beigang R, Rahm M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 241110
- [14] Pendry J B, Schurig D, Smith D R 2006 *Science* **312** 1780
- [15] Wang J F, Zhang J Q, Ma H, Yang Y M, Wu X, Qu S B, Xu Z, Xia S 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1851 (in Chinese) [王甲富, 张介秋, 马华, 杨一鸣, 吴翔, 屈绍波, 徐卓, 夏颂 2010 物理学报 **59** 1851]
- [16] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z, Lin B Q, Zhou H, Bai P, Gu W, Peng W D, Ma H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 087802 (in Chinese) [顾超, 屈绍波, 裴志斌, 徐卓, 林宝勤, 周航, 柏鹏, 顾巍, 彭卫东, 马华 2011 物理学报 **60** 087802]
- [17] Xu X H, Wu X, Xiao S Q, Gan Y H, Wang B Z 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084101 (in Chinese) [徐新河, 吴夏, 肖绍球, 甘月红, 王秉中 2013 物理学报 **62** 084101]
- [18] Zeng R, Xu J P, Yang Y P, Liu S T 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6446 (in Chinese) [曾然, 许静平, 羊亚平, 刘树田 2007 物理学报 **56** 6446]
- [19] Kats A V, Savel'ev S, Yampol'skii V A, Nori F 2008 *Phys. Rev. Lett.* **98** 073901

- [20] Wu Z, Wang Q, Zhou J A, Li C F, Shi J L 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1612 (in Chinese) [吴中, 王奇, 周炯昂, 李春芳, 施解龙 2002 物理学报 **51** 1612]
- [21] Wang W S, Zhang L W, Zhang Y W, Fang K 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024203 (in Chinese) [王五松, 张利伟, 张治文, 方恺 2013 物理学报 **62** 024203]
- [22] Sun T T, Lu K Q, Chen W J, Yao F X, Niu P J, Yu L Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 034204 (in Chinese) [孙彤彤, 卢克清, 陈卫军, 姚风雪, 牛萍娟, 于莉媛 2013 物理学报 **62** 034204]
- [23] Zhang H F, Cao D, Tao F, Yang X H, Wang Y, Yan X N, Bai L H 2010 *Chin. Phys. B* **19** 027301
- [24] Quan J, Tian Y, Zhang J, Shao L X 2011 *Chin. Phys. B* **20** 047201

## Design and experimental verification of a two-dimensional phase gradient metasurface used for radar cross section reduction\*

Li Yong-Feng<sup>1)</sup> Zhang Jie-Qiu<sup>1)†</sup> Qu Shao-Bo<sup>1)</sup> Wang Jia-Fu<sup>1)</sup>  
Chen Hong-Ya<sup>1)</sup> Xu Zhuo<sup>2)</sup> Zhang An-Xue<sup>3)</sup>

1) (College of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

2) (Key Laboratory of Electronic Materials Research of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

3) (School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

( Received 27 November 2013; revised manuscript received 24 January 2014 )

### Abstract

Dealing with potential applications of phase gradient metasurfaces in stealth technologies, we propose to realize wide-band radar cross section (RCS) reduction by combining the two mechanisms of surface wave generation and anomalous reflection. A two-dimensional phase gradient based metasurface is designed using split-ring resonators. Around the designed central frequency  $f = 10$  GHz, the incident waves are coupled into surface waves propagating along the metasurface. While at the frequency band  $f > 11$  GHz, anomalous reflection and diffuse reflection occur. In this way, wide-band RCS reduction can be realized. A test sample with a total thickness of 2 mm is fabricated and its reflection and backward RCS are measured and compared with those of bare metallic plate with the same size. The comparison shows that the metasurface achieves more than 10 dB reduction in the measured wide range (9.5–17.0 GHz). The metasurface is a polarization independent, electrically thin, light-weight and wide-band, so it is of great application values in novel stealth technologies and materials.

**Keywords:** radar cross section, meta-surface, surface waves, anomalous reflection

**PACS:** 41.20.Jb, 73.20.Mf, 77.22.-d, 84.90.+a

**DOI:** 10.7498/aps.63.084103

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 61331005, 11204378, 11274389, 11304393, 61302023), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. 2013M532131, 2013M532221), and the Fundamental Research Project of Shaanxi Province, China (Grant Nos. 2011JQ8031, 2013JM6005).

† Corresponding author. E-mail: zhangjq0@163.com