

基于十字形结构的相位梯度超表面设计与雷达散射截面缩减验证

吴晨骏 程用志 王文颖 何博 龚荣洲

Design and radar cross section reduction experimental verification of phase gradient meta-surface based on cruciform structure

Wu Chen-Jun Cheng Yong-Zhi Wang Wen-Ying He Bo Gong Rong-Zhou

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 164102 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.164102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I16>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海面与其上方双矩形截面柱复合散射的混合算法研究

[Study on composite electromagnetic scattering from the double rectangular cross-section columns above rough sea surface using hybrid method](#)

物理学报.2015, 64(17): 174101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174101>

一种采用互补结构的宽阻带共模缺陷地滤波器

[A broad stopband common-mode suppression defected ground structure filter with complementary structure](#)

物理学报.2015, 64(16): 164101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164101>

基于变换光学的椭圆形透明聚集器的设计研究

[Design and study of the elliptically cylindrical transparent concentrator based on transformation optics](#)

物理学报.2015, 64(15): 154102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154102>

超材料谐振子间的电耦合谐振理论与实验研究

[Theoretical and experimental study of the electric resonant coupling between two metamaterial resonators](#)

物理学报.2015, 64(14): 144101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144101>

基于雷达海杂波的区域性非均匀蒸发波导反演方法

[Inversion of regional range-dependent evaporation duct from radar sea clutter](#)

物理学报.2015, 64(12): 124101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124101>

# 基于十字形结构的相位梯度超表面设计与雷达 散射截面缩减验证\*

吴晨骏 程用志<sup>†</sup> 王文颖 何博 龚荣洲<sup>‡</sup>

(华中科技大学光学与电子信息学院, 武汉 430074)

(2015年1月28日收到; 2015年3月3日收到修改稿)

基于十字形结构设计了一种在雷达波低频段极化不敏感的相位梯度超表面, 并通过仿真和实验进行了验证. 不同金属十字周期结构单元复合, 在超表面上形成附加的平行波矢分量, 对反射波波前进行调控, 获得超表面后向雷达散射截面(RCS)缩减. 在设计波段内, 超表面在法线方向的单站 RCS 缩减达 18.19 dB, 偏离法线  $-30^\circ$ — $+30^\circ$  范围的单站 RCS 平均缩减达 8 dB; 仿真与实验结果符合较好.

**关键词:** 雷达散射截面, 超表面, 相位梯度, 异常反射

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

**DOI:** 10.7498/aps.64.164102

## 1 引言

相位梯度超表面是一种具有亚波长厚度并能够调控电磁波传播特性的平面结构超材料<sup>[1-5]</sup>. 电磁波在相位梯度超表面上的传播遵守广义斯涅耳折射和反射定律<sup>[1,2,6]</sup>, 因此, 与传统的左手材料设计不同, 相位梯度超表面在界面不同位置引入不同的相位突变, 通过精心设计, 以此用于控制电磁波传播特性, 从而为自由调节电磁波的传播提供了一种新途径. 近几年来, 研究者在超表面的设计方法、电磁特性和应用方面取得了长足的进展<sup>[1-11]</sup>. Yu 等<sup>[1]</sup>提出了一种透射型相位梯度超表面, 构建了螺旋形等相面阵, 利用多个 V 字形结构相复合改变光在传输中的相位, 使透射波发生异常折射. Sun 等<sup>[3]</sup>采用 H 形结构制备了反射型相位梯度超表面, 通过控制反射波波前将特定极化角度的入射电磁波耦合为表面波.

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产生异常反射, 因此, 其在隐

身技术中具有重要的应用价值. 为实现超表面在隐身技术中的应用, 基于表面波耦合机理, 屈绍波等<sup>[5,12,13]</sup>设计的开口谐振环结构异常反射超表面有效地降低了后向雷达散射截面(RCS). 然而, 上述设计的超表面具有极化敏感特性, 难以满足现实应用的需求.

十字形结构由于具有结构简单和几何参数易于调节的优点, 目前被认为是最好的超材料基本单元结构<sup>[14,15]</sup>. 本文设计九个不同十字形单元结构, 相邻单元的散射波同时满足相等的反射振幅和反射相位梯度, 组成一种极化不敏感的相位梯度超表面, 实现低频宽带后向 RCS 缩减并通过实验进行验证, 为雷达隐身材料的设计和进一步研究提供了一个新的思路.

## 2 结构设计

### 2.1 理论模型

设电磁波束垂直入射到二维相位梯度超表面上, 如图 1 所示,  $\mathbf{k}_i$  是入射空间波矢, 分别在超表面

\* 国家自然科学基金联合基金(批准号: U1435209)和国家自然科学基金青年基金(批准号: 51207060)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: cyz0715@126.com

<sup>‡</sup> 通信作者. E-mail: rzhong@mail.hust.edu.cn

$x$  和  $y$  方向引入相位梯度  $\nabla\phi_x, \nabla\phi_y$ , 在其表面产生额外的人工波矢, 以此来改变反射波的传播方向.

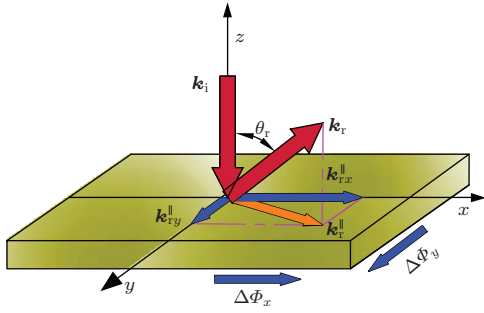


图1 (网刊彩色) 超表面异常反射示意图  
Fig. 1. (color online) Schematic diagram of anomalous reflection on the metasurface.

动量补偿后反射波的平面波矢  $\mathbf{k}_r^{\parallel}$  为

$$\mathbf{k}_r^{\parallel} = \nabla\phi_x + \nabla\phi_y, \quad (1)$$

故反射空间波矢  $\mathbf{k}_r$  为

$$\mathbf{k}_r = \mathbf{k}_r^{\parallel} + \mathbf{k}_z = \nabla\phi_x + \nabla\phi_y + \mathbf{k}_z. \quad (2)$$

根据动量守恒定律,  $\mathbf{k}_r = \mathbf{k}_i$ , 因此, 当  $\mathbf{k}_r^{\parallel} < \mathbf{k}_i$  时, 垂直入射的电磁波被异常反射至其他方向. 对于极化不敏感的相位梯度超表面,  $x$  与  $y$  方向上相位梯度的模相等, 即  $\nabla\phi_x = \nabla\phi_y$ , 因此, 其异常反射角为

$$\theta_r = \arcsin\left(\frac{\sqrt{2}\nabla\phi_x}{k_i}\right), \quad (3)$$

式中,  $k_i$  为波矢量  $\mathbf{k}_i$  的模,

$$k_i = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (4)$$

式中,  $\lambda$  为电磁波在自由空间中的波长. (3) 式中,

$$\nabla\phi_x = \frac{|\Delta\phi_x|}{a}, \quad (5)$$

式中,  $a$  为结构单元基板的边长,  $\Delta\phi_x$  为沿  $x$  方向上单个结构单元间的相位改变值, 将 (4), (5) 式代入

(3) 式可得异常反射角为

$$\theta_r = \arcsin\left(\frac{\sqrt{2}\lambda|\Delta\phi_x|}{2\pi a}\right). \quad (6)$$

## 2.2 超表面结构设计及仿真

图2(a)给出了超表面单元结构示意图. 整个单元由三层材料组成, 最上层为十字形金属结构厚度  $t_m$ , 长度为  $l$ , 宽度为  $w$ , 中介质层为FR4基板 ( $\epsilon_r = 4.3, \tan\delta = 0.0025$ ), 厚度为  $t$ , 底层为金属背板, 厚度为  $d$ , 单位均为 mm.

利用 CST Microwave Studio 的频域求解器计算中心频率 3.3 GHz 处电磁波垂直入射至超表面单元结构时反射波的相位, 将结构几何参数  $t, d, a, l$  固定, 改变结构几何参数  $w$  来调节电磁波的反射相位. 通过仿真优化, 采用了 5 种十字形结构设计了一种  $3 \times 3$  超表面, 其单元结构几何参数分别为  $t = 2$  mm,  $d = t_m = 0.035$  mm,  $(a, l, w) = (25, 23, 1.1)$  mm,  $(25, 23, 1.6)$  mm,  $(25, 23, 3.7)$  mm,  $(25, 23, 5.4)$  mm,  $(25, 23, 12.9)$  mm. 图2(b)给出了单元结构组成超表面后的结构示意图. 在 3.3 GHz 处, 此超表面通过上述结构几何参数的设计, 使其在  $x$  方向与  $y$  方向上相邻结构单元之间的相位差为  $\Delta\phi = 60^\circ$ , 因此, 相位梯度的模为  $1000\pi/75$  rad/m. 由 (6) 式计算得超表面异常反射角为  $\theta_r \approx 58^\circ$ .

为了验证所设计的超表面, 本文利用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 的频域求解器对超表面进行仿真.  $x$  和  $y$  方向边界设为 unit cell,  $z$  方向上设置为 open (add space) 边界, 求解反射率 ( $S_{11}$  参数). 不同极化角的电磁波垂直入射到超表面, 如图3(a)所示, 其中极化角为  $\varphi$ .

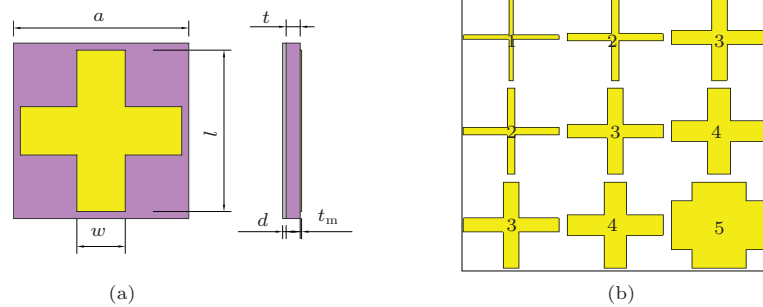


图2 (网刊彩色) 超表面结构设计示意图 (a) 结构单元; (b) 超表面

Fig. 2. (color online) Structure diagram of metasurface: (a) unit of metasurface; (b) metasurface.

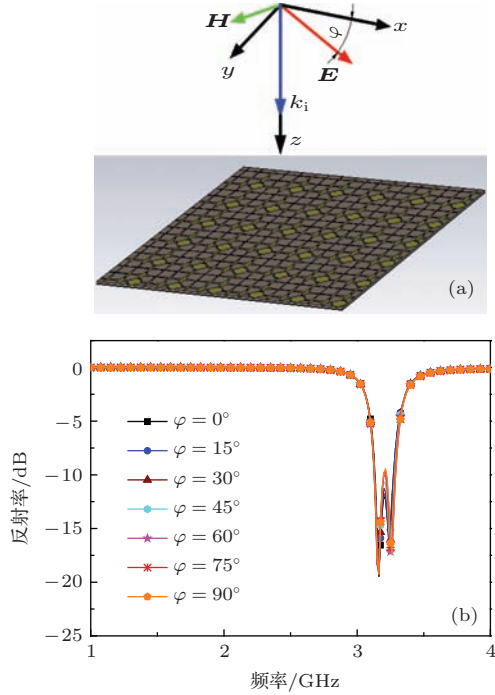


图3 (网刊彩色) (a) 极化电磁波垂直入射示意图; (b) 反射率仿真结果

Fig. 3. (color online) (a) Schematic diagram of normal incidence of the polarized electromagnetic wave; (b) simulated result of reflectance.

仿真结果如图3(b)所示,可以看出,不同极化角度的电磁波垂直入射到超表面时,反射率仅存在微小差异,充分证明了所设计的超表面具有极化不敏感特性.在3.2和3.4 GHz处出现了两个反射率低谷,最深处下降至约-20 dB.此时,入射波被异常反射至其他方向,有效降低了垂直方向的反射率.但对于不同极化角度的入射电磁波,反射率最小值所在频率相对于中心频率均存在一定偏移,这是由相邻十字形单元间电磁耦合强度不一引起的.

### 3 实验验证与结果分析

根据以上优化设计的单元结构几何参数,利用平面印刷电路板技术加工制作了尺寸为450 mm × 450 mm的测试样品,基板采用厚度为2 mm的FR4,表面覆铜刻蚀出所设计的十字形结构图案,如图4所示,其中插图为单个超表面单元结构放大图.在暗室中采用弓形法测试不同极化角度的电磁垂直入射至超表面时的反射率,结果如图5所示.

从图5中可以看出,在不同极化角情况下,反射率基本保持不变,进一步表明设计的超表面具有

极化不敏感特性.另外,在3.2与3.4 GHz处,反射率分别达到最大谷值-13.7与-17.7 dB,与仿真结果基本一致.仿真与实验均表明,相位梯度超表面在中心频点3.3 GHz附近,反射率为-10 dB的带宽约等于0.2 GHz.

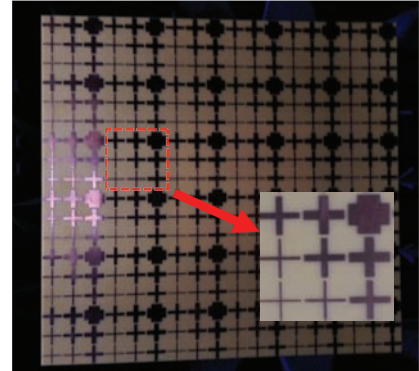


图4 (网刊彩色) 超表面样品

Fig. 4. (color online) The sample of metasurface.

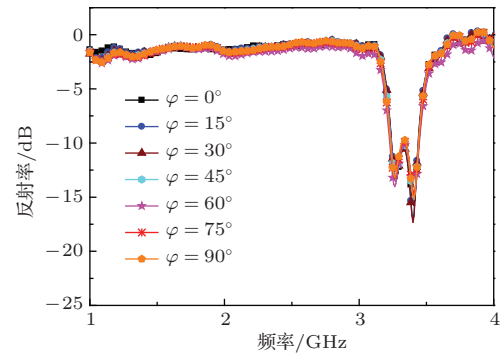


图5 (网刊彩色) 反射率测试结果

Fig. 5. (color online) Experimental result of reflectance.

在微波暗室安装泡沫塔,将泡沫夹具置于泡沫塔上,固定样品使其保持竖直,喇叭天线固定且与测试样品中心点处于同一高度,通过旋转泡沫塔改变入射角度,测试样品频率在3.4 GHz,方位角为-30°—+30°的单站后向RCS;在相同环境下,测试同尺寸金属板作为对比,所得结果如图6所示.

从图6中可以看出,在3.4 GHz处,相比于同尺寸金属板,超表面后向RCS缩减效果显著,最大缩减达到18.19 dB,平均缩减达8 dB.这是由于电磁波在超表面上的传输遵守广义斯涅耳定律<sup>[1,2,6]</sup>,使得超表面可将入射电磁波异常反射至其他方向,大大减弱原入射方向上的回波信号,从而显著缩减其单站后向RCS.

为了验证相位梯度超表面是通过异常反射缩减后向RCS,我们利用CST Microwave Studio实施

进一步仿真. 设置波导端口与电场监控器, 并用时域求解器跟踪 3.4 GHz 处入射面上的电场, 图 7 给出了  $xoz$  面与  $yo z$  面的电场分布情况. 从图 7 中可看出, 在电磁波垂直入射情况下, 由于在超表面分界面上存在相位梯度, 引入了附加的动量, 能量沿着异常反射的方向传输. 同时, 本文设计的超表面具有极化不敏感特性, 在  $xoz$  面与  $yo z$  面, 反射波的偏折角度基本相同, 约为  $45^\circ$ , 因此在空间当中反射波的偏折角度约为  $55^\circ$ , 与上文的理论预测值也比较相符.

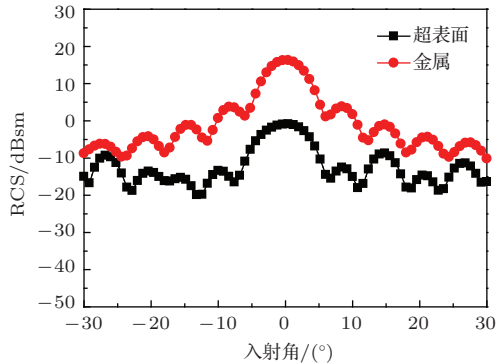


图 6 (网刊彩色) RCS 测试曲线

Fig. 6. (color online) Radar cross section of the metal and metasurface.

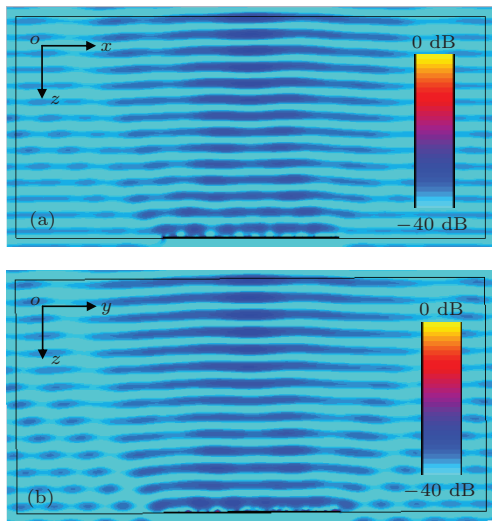


图 7 (网刊彩色) 入射面上的电场分布 (a)  $xoz$  面; (b)  $yo z$  面

Fig. 7. (color online) Electric field of the incidence plane: (a) plane of  $xoz$ ; (b) plane of  $yo z$ .

## 4 结 论

本文设计并制作了一种在雷达波低频段能够显著缩减后向 RCS 的相位梯度超表面. 通过相位

梯度设计控制入射电磁波的反射特性. 仿真了不同极化角度电磁波垂直入射至超表面的反射率, 根据仿真设计制作了样品并测试了其反射率, 结果均证明其超表面具有极化不敏感特性. 在微波暗室中对比测试超表面和相同尺寸金属板的单站后向 RCS, 其超表面在法线方向的单站 RCS 缩减达 18.19 dB,  $-30^\circ$ — $+30^\circ$  角域的单站 RCS 平均缩减达 8 dB. 本文设计和制备的超表面具有厚度薄 (仅为 2.07 mm, 约为工作波长的  $1/45$ )、极化不敏感等特性, 为雷达隐身材料及 RCS 缩减的研究提供了新思路, 具有潜在的应用前景.

## 参考文献

- [1] Yu N, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [2] Aieta F, Genevet P, Yu N, Kats M A, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Nano Lett.* **12** 1702
- [3] Sun S, He Q, Xiao S, Xu Q, Li X, Zhou L 2012 *Nature Mater.* **11** 426
- [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] 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
- [6] Han L, Wang Z N 2013 *College Physics* **32** 0349 (in Chinese) [韩璐, 王兆娜 2013 大学物理 **32** 0349]
- [7] Yampol'skii V A, Gulevich D R, Savel'ev S, Nori F 2008 *Phys. Rev. B* **78** 054502
- [8] Yampol'skii V A, Kats A V, Nesterov M L, Nikitin A Y, Slipchenko T M, Savel'ev S, Nori F 2009 *Phys. Rev. B* **79** 214501
- [9] Kats A V, Savel'ev S, Yampol'skii V A, Nori F 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 073901
- [10] Zhang H F, Cao D, Tao F, Yang X H, Wang Y, Yan X N, Bai L H 2010 *Chin. Phys. B* **19** 027301
- [11] Quan J, Tian Y, Zhang J, Shao L X 2011 *Chin. Phys. B* **20** 047201
- [12] Chen H Y, Wang J F, Ma H, Qu S B, Zhang A X 2014 *J. Microwaves* **30** 1 (in Chinese) [陈红雅, 王甲富, 马华, 屈绍波, 张安学 2014 微波学报 **30** 1]
- [13] 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]
- [14] Cheng Y Z, Nie Y, Gong R Z 2013 *Appl. Phys. B* **111** 483
- [15] Cheng Y Z, Nie Y, Wang X, Gong R Z 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 064902

# Design and radar cross section reduction experimental verification of phase gradient meta-surface based on cruciform structure\*

Wu Chen-Jun Cheng Yong-Zhi<sup>†</sup> Wang Wen-Ying He Bo Gong Rong-Zhou<sup>‡</sup>

(School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

( Received 28 January 2015; revised manuscript received 3 March 2015 )

## Abstract

A two-dimensional phase gradient meta-surface based on cross structure insensitive to polarization is designed and verified by simulation and experiment. Several periodic metal cross structures are integrated into a superstructure, and an additional component of the wave vector on the meta-surface is formed and the direction of reflection wave can be regulated. Thus the backward radar cross section (RCS) reduction can be realized by the mechanism of anomalous reflection. Experimental results indicate that in a frequency range from 3.2 to 3.4 GHz, the reduction of backward RCS of meta-surface reaches a highest value of 18.19 dB in the normal direction of meta-surface and 8 dB on the average in an angular range between  $-30^\circ$  and  $+30^\circ$ .

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

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

**DOI:** 10.7498/aps.64.164102

---

\* Project supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1435209) and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51207060).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [cyz0715@126.com](mailto:cyz0715@126.com)

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