

# 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\*

闫昕<sup>1)2)</sup> 梁兰菊<sup>1)2)†</sup> 张雅婷<sup>1)</sup> 丁欣<sup>1)</sup> 姚建铨<sup>1)‡</sup>

1)(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

2)(枣庄学院光电工程学院, 枣庄 277160)

(2015年1月22日收到; 2015年4月26日收到修改稿)

本文设计了一种柔性, 非定向低散射的1bit编码超表面, 实现了太赫兹宽频段雷达散射截面的缩减. 这种设计基于对“0”和“1”两种基本单元进行编码, 其反射相位差在很宽的频段范围内接近 $180^\circ$ , 为一种非周期的排列方式, 该电磁超表面使入射的电磁波发生漫反射, 从而实现雷达散射截面的缩减. 全波仿真结果表明, 在垂直入射条件下, 编码超表面的镜像反射率低于 $-10$  dB的带宽频段范围为 $1.0\text{--}1.4$  THz, 该带宽内超表面相对同尺寸金属板可将雷达散射截面所减量达到 $10$  dB以上, 最大缩减量达到 $19$  dB. 把柔性编码表面弯曲在直径为 $4$  mm的金属圆柱面上, 雷达散射截面的所减量高于 $10$  dB以上的带宽频段范围为 $0.9\text{--}1.2$  THz, 仍然可实现宽频段缩减特性. 总之, 编码超表面为调控太赫兹波提供一种新的途径, 将在雷达隐身、成像、宽带通信等方面具有重要的意义.

**关键词:** 编码超表面, 非定向散射, 雷达散射截面, 太赫兹

**PACS:** 81.05.xj, 42.25.Fx, 41.20.Jb, 87.50.U-

**DOI:** 10.7498/aps.64.158101

## 1 引言

太赫兹波(Terahertz, THz)是频率为 $0.1\text{--}10$  THz之间电磁辐射, 处于电子学向光光学的过渡阶段. 相对于红外和微波, 太赫兹波具有高透性、低能性、宽带性和指纹谱性等众多优越特性<sup>[1-4]</sup>, 因此在高空间分辨率、军用雷达、高灵敏探测、大容量无线通信、安检成像等方面显现出广阔的应用前景<sup>[5-10]</sup>. 在这些应用中不仅需要性能稳定的THz辐射源和探测器, 同时需要各种功能的太赫兹器件调控太赫兹波的反射、散射、传输等特性, 特别是在军事雷达隐身等方面.

为了实现雷达隐身, 主要通过降低目标雷达回波的信号. 衡量目标雷达回波能力强弱的物理量主

要为雷达散射截面(radar cross section RCS). 缩减RCS(被吸收或者低散射)的办法<sup>[11-16]</sup>主要有1)完美吸收器, 2)非定向散射特性, 3)新型吸波涂层材料(铁氧体、导电高分子等). 利用完美吸收器实现RCS缩减基本原理是电磁波的能量被超表面吸收, 这样改变物体的温度有可能被远红外探测器探测到. 另外, 吸收器仍然存在带宽窄等缺陷. 利用新型吸波涂层材料减小RCS, 在微波波段已经被广泛的应用, 但是在太赫兹波段很难有响应的涂层材料. 近年来, 电磁超表面由于其独特的电磁响应特性得到了世界各国研究者的广泛关注, 利用该超表面实现雷达散射截面的缩减技术在微波等波段取得了长足的发展, 但是有关太赫兹波段国内外相关报道较少<sup>[17-22]</sup>. 2014年张介秋课题组提出通过表

\* 国家自然科学基金(批准号: 61271066)、山东省科技发展计划项目(批准号: 2013GGA04021)、中国博士后科学基金(批准号: 2015M571263)、山东省高等学校科技计划项目和(批准号: J15LN36)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lianglanju123@163.com

‡ 通信作者. E-mail: jqyao@tju.edu.cn

面波耦合和异常反射两种机理设计相位梯度超表面实现微波波段宽频带 RCS 缩减<sup>[14]</sup>. 同年, Wang 等利用不同长度的风车型单元结构构造人工电磁随机超表面<sup>[19]</sup>, 利用漫反射特性实现微波波段宽频带 RCS 的缩减. 2011 年 Iwaszczuk 等利用 THz 时域雷达系统研究柔性吸收器覆盖在金属铝圆柱侧面不同频段的 RCS<sup>[9]</sup>. 在垂直入射条件下, 吸收器在频率 0.87 THz 处反射率约为 -27 dB, 透过率为 0, 相应的吸收率为 98%, 因此在该频率处吸收器的 RCS 相对金属表面减小为 1/400 左右, 其他频段的 RCS 相对金属表面基本没有缩减. 但是该吸收器实现 RCS 缩减量带宽窄, 为此, 实现太赫兹波段宽频带 RCS 缩减具有非常重要的意义.

2014 年, Cui 等提出了一种“编码超表面”的新概念, 这种超表面由较宽频带内相位差保持基本稳定的电磁超材料单元组成, 主要分为 1bit, 2bit, 3bit 等超表面<sup>[22]</sup>. 1bit 编码超表面由较宽频带范围内反射相位差接近 180° 两种基本单元组成, 相当于二进制代码中的“1”和“0”, 2bit 编码超表面由反射相位差依次接近 90° 的四种基本单元组成, 相当于“00”, “01”, “10”与“11”代码, 更高 bit 编码超表面以此类推. 编码超表面实现雷达散射截面缩减的基本原理是把电磁波的能量散射到各个方向, 由能量守恒原理可知每束的散射波能量很小, 其带宽特性主要与不同单元的恒定反射相位差的带宽决定. 该编码超表面无需从等效媒质参数的角度来设计, 而只需设计相应的单元编码次序, 就可以调控电磁波, 实现预期的各种功能, 包括实现特定方向的散射波、减小雷达散射截面等. 2014 年, Cui 等利用 1bit 和 2bit 编码超表面的非定向散射特性实现了微波波段宽频带 RCS 的缩减. 在垂直入射下, 1bit 和 2bit 编码超表面相对同尺寸的金属板 RCS 的缩减量超过 10 dB 的带宽频段范围分别为 7.5—13 GHz 和 7—16 GHz<sup>[22]</sup>. 为此, 利用编码超表面可实现宽频带 RCS 的缩减.

本文设计了柔性 1bit 编码电磁超表面, 其散射特性主要由不同的编码序列决定. 仿真和计算结果表明, 特定的周期编码超表面使入射的电磁波产生特定数目的散射波, 非周期的编码超表面将入射的电磁波散射到各个方向形成漫反射, 实现了太赫兹波段宽频带 RCS 缩减. 在 1.0—1.4 THz 内, 编码超表面可将 RCS 的所减量达到 10 dB 以上, 把该表面弯曲在直径为 4 mm 的金属圆柱面上, 在

0.9—1.2 THz 范围内仍可以实现 RCS 的缩减. 总之, 利用柔性 1bit 编码超表面漫反射特性为实现太赫兹宽频带 RCS 的缩减提供了一种有效的方法.

## 2 1 bit 编码超表面设计

### 2.1 设计原理

本文设计的编码超表面, 基本原理是借助反射阵天线的基本原理<sup>[22]</sup>, 对入射的电磁波没有吸收或者损耗, 而是打散到各个方向, 形成一个无规律、杂乱的无数散射波, 根据能量守恒原理, 每束散射波的能量很小从而实现 RCS 缩减.

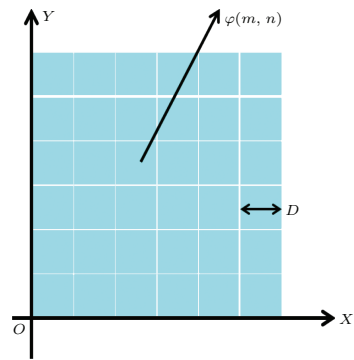


图 1 (网刊彩色) 电磁超表面示意图 (包含  $N \times N$  大小为  $D$  的阵元, 每个阵元为“0”或者“1”基本单元组成)  
Fig. 1. (color online) The diagram of the electromagnetic metasurface, which contains  $N \times N$  lattices with dimension  $D$ , in which each lattices is occupied by a “0” and “1” elements.

如图 1 为编码超表面原理示意图, 假设该表面有  $N \times N$  个阵元组成, 每个阵元为“0”或者“1”基本单元组成, “0”和“1”基本单元的分布是非周期的. 假设每个单元的反射或者散射相位为  $\varphi(m, n)$ , 则其相位为 0° 或者 180°. 平面波垂直入射下, 该表面的远场散射表示为

$$f(\theta, \varphi) = f_e(\theta, \varphi) \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \exp \left\{ -i \left\{ \varphi(m, n) + KD \sin \theta [(m-1/2) \cos \varphi + (n-1/2) \sin \varphi] \right\} \right\}, \quad (1)$$

其中  $\theta$  和  $\varphi$  为入射角和方位角,  $f_e(\theta, \varphi)$  为单个阵元的辐射特性.

方向图函数表示为

$$\text{Dir}(\theta, \varphi) = \frac{4\pi |f(\theta, \varphi)|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi |f(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi}. \quad (2)$$

因为“0”和“1”的编码基本单元相位为 $0^\circ$ 或者 $180^\circ$ ，两单元的散射特性相消， $f_e(\theta, \varphi)$ 的辐射特性基本为零。从以上两式看出，控制电磁编码超表面远场散射特性主要通过编码阵元的不同序列方式实现。

为了计算不同序列编码超表面的散射场，假设编码超表面为一维编码序列，沿着 $x$ 轴方向，如图2(a)所示。编码超表面的“0”和“1”单元代表偶极子辐射源， $x$ - $z$ 平面的远场辐射可以表示为

$Ae^{i(k \cdot r - \omega t)}$ ， $A$ 为散射波振幅矢量。因此在 $r$ 处整个散射场可以表示为所有偶极子辐射源的电场之和(忽略 $e^{-i\omega t}$ )，即

$$E = \sum_n A_n e^{ik \cdot (r - r'_n)} = \sum_n A_n e^{i\left(\frac{2\pi \sin \theta}{\lambda}(x - x'_n) + \frac{2\pi \cos \theta}{\lambda}z\right)}, \quad (3)$$

其中 $n$ 表示第 $n$ 个偶极子辐射源， $x'_n$ 为第 $n$ 个偶极子辐射源的位置坐标。

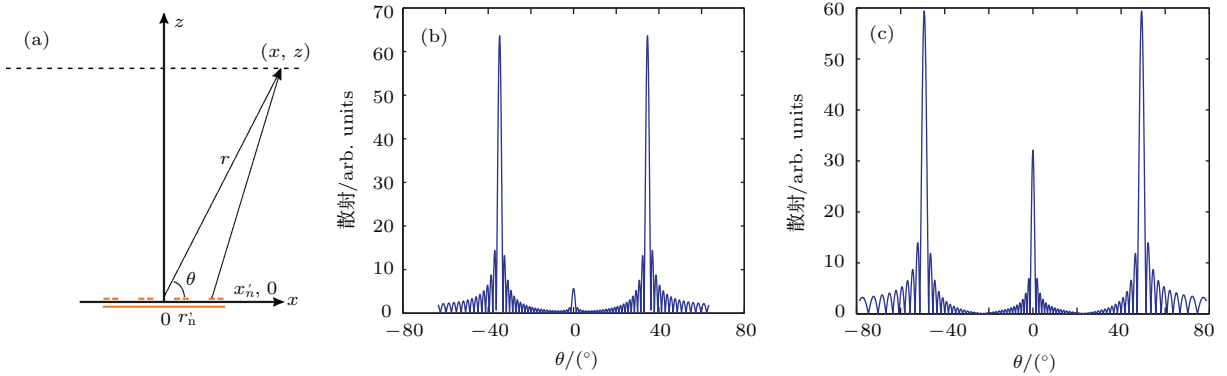


图2 (网刊彩色) (a) 一维编码超表面示意图; (b) 一维11001100...编码序列超表面散射特性; (c) 一维110110110...编码序列超表面散射特性

Fig. 2. (color online) (a) Schematic of the 1D coding metasurface; (b) Scattering of 1D sequences 11001100... metasurface; (c) Scattering of 1D sequences 110110110... metasurface.

利用(3)式计算11001100...和110110110...不同序列周期编码超表面的散射特性，其中“0”和“1”单元间距为 $P = 110 \mu\text{m}$ ，包含单元个数为100， $z = 1 \text{ m}$ ，频率 $f = 1.2 \text{ THz}$ ，如图2所示。对于11001100...编码超表面，散射波的波束数目为2，而对于110110110...编码超表面，散射波的波束数目为3。另外，对于11001100...编码超表面，其两束散射波所在的角度由 $\theta = \pm \arcsin(\lambda/4P)$ 决定，其中 $\lambda$ 波长，对于110110110...编码超表面，其三束散射波所在的角度由 $\theta = 0$ 和 $\theta = \pm \arcsin(\lambda/3P)$ 决定[6]。

因此，为实现多波束散射即漫反射特性，需通过对“0”和“1”两种基本单元进行不同的序列编码，把金属目标特征性极强的反射峰打散成一个无规律、杂乱的波，从而实现RCS的缩减。

## 2.2 编码超表面结构设计

如图3为优化设计太赫兹1bit编码电磁超表面的单元结构示意图，周期为 $2.2 \text{ mm} \times 2.2 \text{ mm}$ ，

整个单元由三层组成，分别为金膜-聚酰亚胺薄膜-金属电磁超表面。金的厚度为 $200 \text{ nm}$ ，中间介质层聚酰亚胺厚度为 $h = 40 \mu\text{m}$ ，聚酰亚胺的介电常数为3.1，介电损耗为0.05，两个相邻方环间距 $P = 110 \mu\text{m}$ ，环的线宽 $w = 5.5 \mu\text{m}$ ，方环的长度 $L = 64 \mu\text{m}$ 。利用电磁仿真软件CST Microwave Studio计算金膜-聚酰亚胺薄膜以及金膜-聚酰亚胺薄膜-金属方环的反射相位。从图3(c)看出，在 $0.8\text{--}1.4 \text{ THz}$ 带宽频段范围内，金属方环与无金属结构的反射相位差接近 $180^\circ$ ，其变化范围为 $180^\circ\text{--}200^\circ$ ，因此把金膜-聚酰亚胺-单个金属方环结构作为“1”单元，金膜-聚酰亚胺薄膜作为“0”单元。整个编码超表面的单元为 $20 \times 20$ 个阵元组成，表示为“0001101101...”，为一种准周期排列方式。图3(d)为利用(3)式计算设计的1维0001101101...编码超表面散射特性，从计算结果可知，该编码超表面的散射波束为无数，具有非定向散射特性，可以实现RCS的缩减。

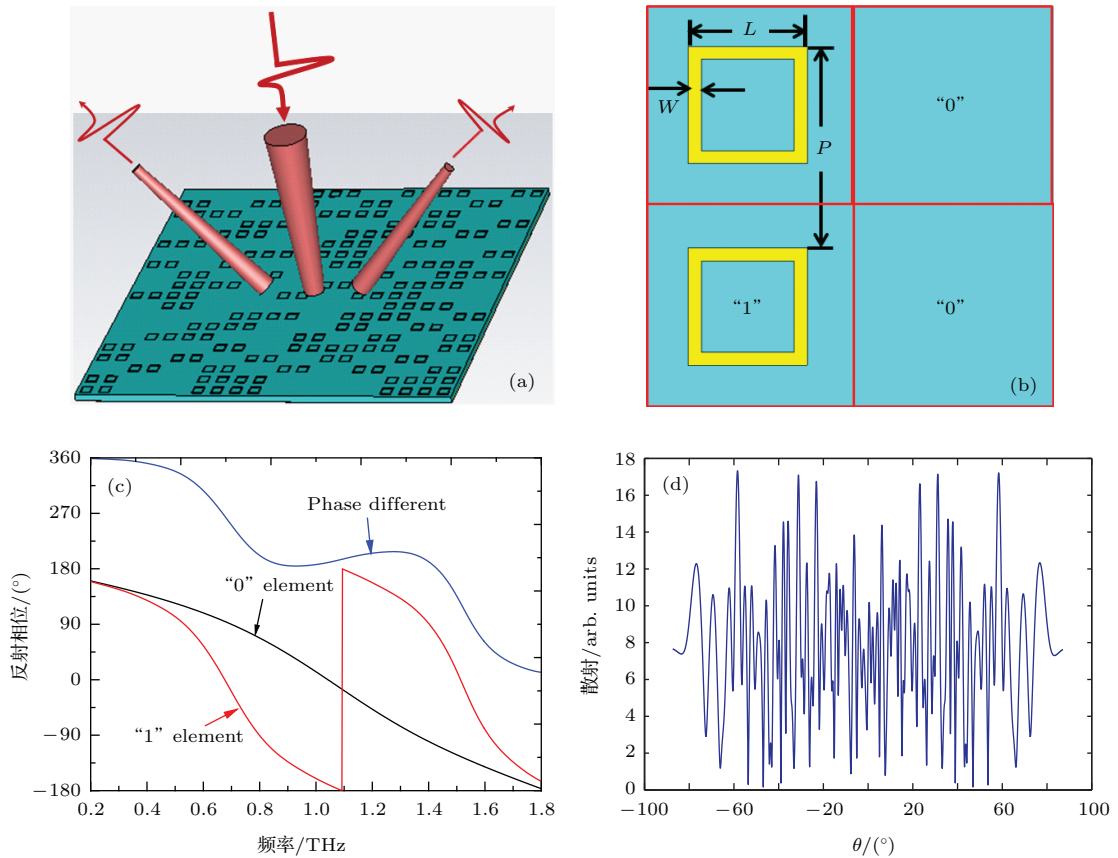


图3 (网刊彩色) (a) 编码电磁超表面示意图; (b) 相邻的金属方环示意图 (参数设置为:  $P = 110 \mu\text{m}$ ,  $w = 6 \mu\text{m}$ ,  $L = 64 \mu\text{m}$ ); (c) 相邻的“0”和“1”两种基本单元反射相位差与频率的关系; (d) 一维0001101101... 编码序列超表面散射特性  
 Fig. 3. (color online) (a) Schematic of coding metasurface; (b) Schematic of metallic square ring, the parameter are:  $P = 110 \mu\text{m}$ ,  $w = 6 \mu\text{m}$ ,  $L = 64 \mu\text{m}$ ; (c) The reflected phase difference of the “0” and “1” element in a range THz frequencis; (d) Scattering of 1 D coding sequences 0001101101... metasurface.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 太赫兹波段反射曲线的仿真

利用电磁场 CST Microwave Studio 软件对编码 1bit 电磁超表面进行全波仿真. 图4为垂直入射

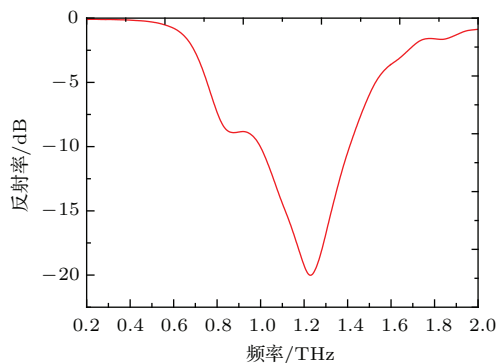


图4 (网刊彩色) 垂直入射情况下, 编码超表面 THz 波反射谱仿真曲线  
 Fig. 4. (color online) The simulated reflection spectrum under the normal incident angle in THz frequencies for coding metasurface.

情况下, 编码超表面 THz 波的反射率与频率变化关系. 对于设计的 1bit 太赫兹编码超表面, 从仿真结果可知, 反射率小于  $-10 \text{ dB}$  的带宽频段范围为  $1\text{--}1.4 \text{ THz}$ , 与“0”和“1”两种基本单元的反射相位差接近  $180^\circ$  的带宽频段范围比较一致, 在  $f = 1.2 \text{ THz}$  处, 反射率小于  $-20 \text{ dB}$ . 该表面超表面实现宽带镜像低反射效果.

#### 3.2 编码超表面远场散射 RCS 的仿真

为了研究编码电磁超表面的散射特性, 利用电磁场 CST Microwave Studio 软件的平面波进行了不同序列的编码超表面以及不同频率下的远场散射特性进行模拟仿真. 在  $f = 1.2 \text{ THz}$  处对于  $11001100\dots/11001100\dots$  和  $110110110\dots/110110110\dots$  周期编码超表面, 其远场散射特性如图5所示. 从图可知太赫兹编码超表面散射波束分别为 2 波束与 3 波束, 数值模拟结果与理论计算的结果基本一致, 这进一步证明了理论计算的



确性.

而对于设计的非周期序列0001101101... 编码超表面的散射特性. 从图6看出, 反射率小于-10 dB 带宽频段范围内(1.0 THz 和 1.2 THz), 覆盖了编码超表面的后向RCS分布为水花状, 散射波的数目为无数, 电磁波的能量分散到各个方向, 每束的散射波能量非常小, 因此可以起到降低RCS, 在应用上干扰敌方雷达波正常判断的作用, 实现隐身效果. 对于  $f = 0.6$  THz 和  $f = 1.6$  THz 处, 反射率大于-10 dB, 后向RCS为锋利的“锥状”, 没有形成漫反射的效果. 这是因为这两个频率处“0”

和“1”两种单元的反射相位差远偏离180°, 两单元的相消散射特性减弱.

为了更直观的观察编码超表面的远场散射效果, 数值模拟了频率为1.2 THz处, 电磁波垂直入射到金属板和编码电磁超表面的散射特性, 如图7所示. 从图中看出, 对于金属板散射波主要集中在0°, 产生一个较强的镜像反射, 因此该散射波的能量很强. 对于编码电磁超表面, 散射波分布在各个方向, 基本是在-90°—90°之间, 由能量守恒原理可知每个方向的散射波分布的能量很小, 该仿真结果进一步表明编码超表面可以起到减小RCS.

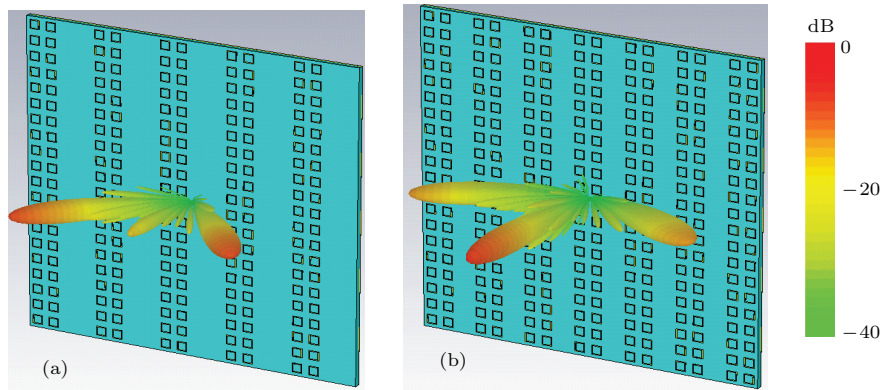


图5 (网刊彩色) 1.2 THz 编码超表面远场散射仿真结果 (a) 11001100... /11001100...; (b) 110110110... /110110110...

Fig. 5. (color online) Simulation far-field patterns of the scattering results of: (a) 11001100... /11001100...; (b) 110110110... /110110110... at 1.2 THz for coding metasurface.

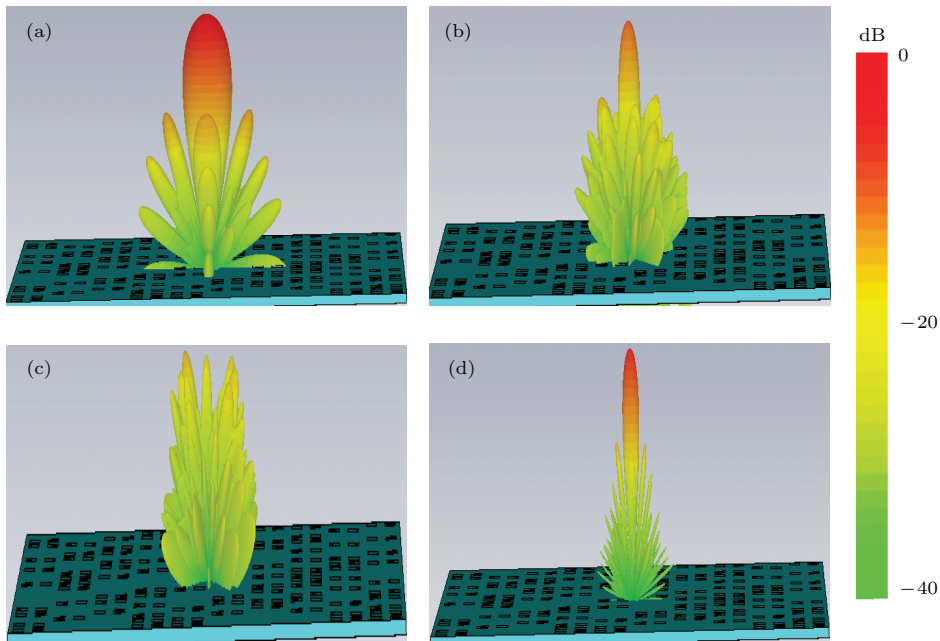


图6 (网刊彩色) 编码超表面不同频率的远场散射仿真结果 (a) 0.6 THz; (b) 1.0 THz; (c) 1.2 THz; (d) 1.6 THz

Fig. 6. (color online) Simulation far-field patterns of the scattering results of coding metasurface at (a) 0.6 THz, (b) 1.0 THz, (c) 1.2 THz and (d) 1.6 THz.

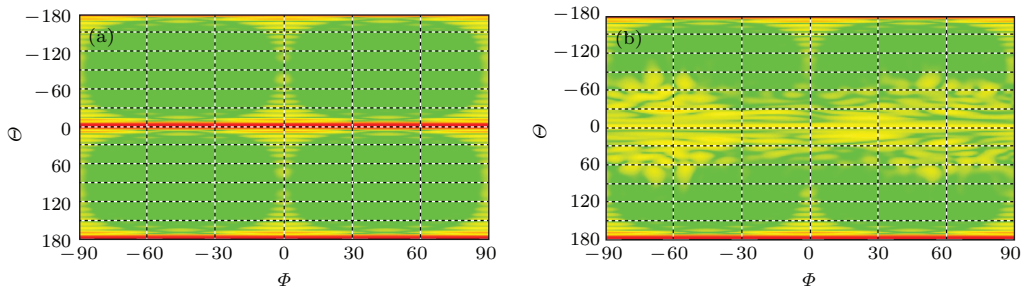


图7 (网刊彩色) 频率为1.2 THz处的远场散射图 (a) 金属板; (b) 编码电磁超表面

Fig. 7. (color online) Simulation far-field patterns of the scattering results of coding metasurface at 1.2 THz: (a) the metallic plate; (b) coding metasurface.

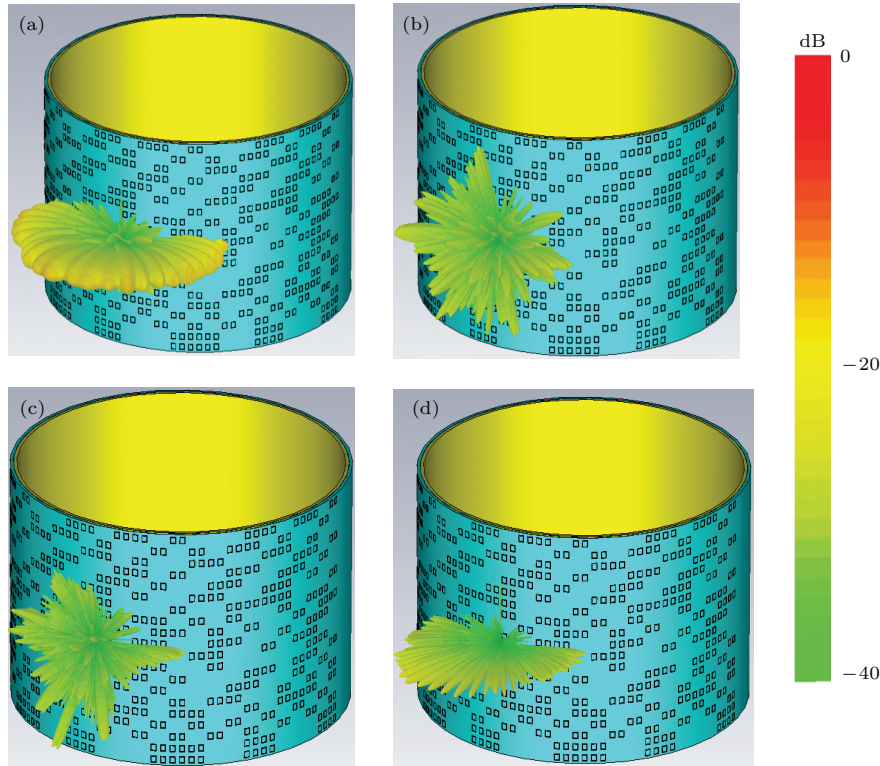


图8 (网刊彩色) 不同频率的远场 RCS 仿真结果 (a) 0.6 THz; (b) 1.0 THz; (c) 1.2 THz; (d) 1.6 THz, 编码超表面弯曲在直径为4 mm的金属圆柱上

Fig. 8. (color online) Simulation far-field patterns of the scattering results of coding metasurface at (a) 0.6 THz, (b) 1.0 THz, (c) 1.2 THz and (d) 1.6 THz, the metasurface is wrapped around a cylinder with diameter of 4 mm.

为了表征柔性编码超表面特性, 把设计的超表面弯曲在直径为4 mm的金属圆柱上, 并进行了不同频率下远场 RCS 仿真, 如图8所示. 从图中看出, 在反射率小于-10 dB带宽频带范围内(1.0 THz和1.2 THz), 覆盖了编码超表面的后向远散射场同样变成了水花状, 在应用上可以起到降低 RCS, 实现良好的隐身效果. 该柔性编码超表面与其他器件更易共形, 这将进一步满足不同方面的实际需求. 对于  $f = 0.6$  THz 和  $f = 1.6$  THz 处, 超表面的反射率大于-10 dB, 后向远散射场没有形成漫反射效

果, RCS 的缩减效果会明显变弱, 另外这两个频率处的“0”和“1”两种基本单元的反射相位差并不在180°左右. 因此, 1bit 柔性编码超表面弯曲在金属圆柱上, 仍能实现宽频段 RCS 的缩减.

### 3.3 太赫兹编码超表面 RCS 的缩减仿真

图9为电磁波垂直入射时, 编码电磁超表面为平面和弯曲面两种情况下相对同尺寸金属板的 RCS 缩减量. 从图9(a)中看出, 对于平面情况, 在频率为1—1.4 THz 范围内, 编码超表面相对于金

属板的 RCS 缩减量超过 10 dB, 具有宽带特性, 该宽频带特性同样与“0”和“1”两种单元的反射相位差接近 180° 的带宽基本一致. 在频率  $f = 1.2$  THz, RCS 缩减量达到 19 dB, 该频率处的反射率也特别低. 如果把编码超表面弯曲在直径为 4 mm 的金属圆柱上, 在频率 0.9—1.2 THz 范围内, 超表面相对于金属板的 RCS 缩减量仍然超过 10 dB, 同样具有宽频带 RCS 缩减特性. 编码超表面弯曲在金属圆柱的 RCS 缩减量相对于平面电磁超表面, 性能稍微变弱, 这是由于数值仿真编码超表面“0”与“1”单元反射相位是针对平面电磁超表面. 为了实现弯曲编码超表面更好的 RCS 缩减效果, 可以考虑不同曲率对超表面“0”与“1”基本单元的反射相位差的影响. 总之, 设计的 1bit 柔性编码超表面实现了宽带后向 RCS 的缩减.

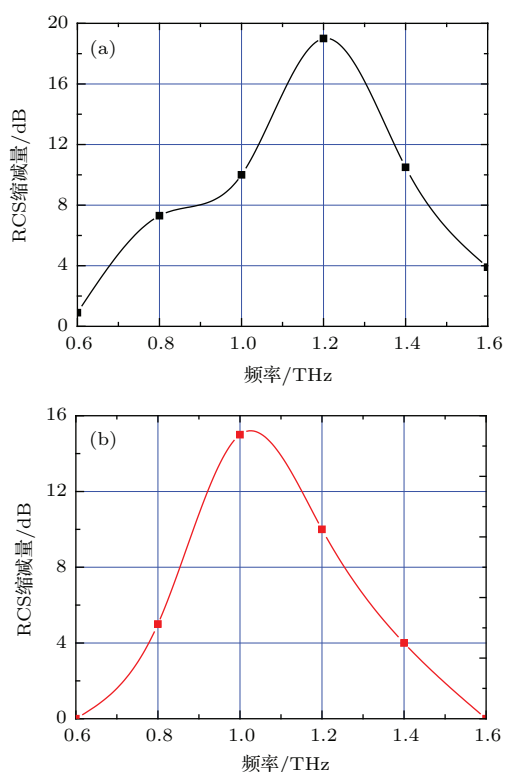


图9 (网刊彩色) 电磁波垂直入射时, 编码超表面相对于金属板的 RCS 缩减量 (a) 平面; (b) 弯曲表面, 编码超表面弯曲在直径为 4 mm 的金属圆柱上

Fig. 9. (color online) Simulation results of RCS reduction for the metallic plate: (a) plate metasurface; (b) curved metasurface, the coding metasurface is wrapped around a cylinder with diameter of 4 mm.

## 4 结 论

本文提出了利用编码超表面的非定向散射特性实现了太赫兹宽频段 RCS 的缩减. 模拟仿真与

理论计算表面, 对于周期编码超表面的散射波的波束为有限数目. 对于非周期编码超表面, 散射波的数目无数, 实现了漫反射的效果, 且在 1—1.4 THz 之间的反射率小于 -10 dB. 相对同样大小的金属板, 不管是平面或者弯曲的编码超表面, 在很宽的频段范围内, RCS 缩减量相对金属板都超过 10 dB. 编码超表面的宽带 RCS 缩减特性与“0”与“1”两个基本单元的反射相位差相差 180° 的带宽频段基本一致. 总之, 编码超表面是一种有效的宽带后向 RCS 缩减结构, 在太赫兹雷达隐身等方面具有重要的意义.

感谢东南大学崔铁军教授、南京大学金飏兵教授和美国洛斯阿拉莫斯国家实验室陈侯通教授对理论模型与计算的指导.

## 参考文献

- [1] Ferguson B, Zhang X C 2002 *Nat. Mater.* **1** 26
- [2] Tonouchi M 2007 *Nat. Photonics* **1** 97
- [3] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [4] Xie L, Yao Y, Ying Y 2014 *Appl. Spectrosc. Rev.* **49** 448
- [5] Benz A, Krall M, Schwarz S, Dietze D, Detz H, Andrews A M, Schrenk W 2014 *Sci. Rep.* **4** 1
- [6] Nagatsuma T 2011 *IEICE Electronic Exp.* **8** 1127
- [7] Federici J, Moeller L 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 111101
- [8] Alves F, Grbovic D, Kearney B, Karunasiri G 2012 *Opt. Lett.* **37** 1886
- [9] Iwaszczuk K, Strikwerda A C, Fan K, Zhang X, Averitt R D, Jepsen P U 2011 *Opt. Express* **20** 635
- [10] Hua H Q, Jiang Y S, He Y T 2014 *Prog. Electromagn. Res. B* **59** 193
- [11] Li S J, Cao X Yu, Gao J Z, Qiu R Z, Yi Y Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 194101 (in Chinese) [李思佳, 曹祥玉, 高军, 郑秋容, 陈红雅, 赵一, 杨群 2013 物理学报 **62** 194101]
- [12] Cheng C W, Abbas M N, Chiu C W, Lai K T, Shih M H, Chang Y C 2012 *Opt. Express* **20** 10376
- [13] Yang X M, Zhou X Y, Cheng Q, Ma H F, Cui T J 2010 *Opt. Lett.* **35** 808
- [14] 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]
- [15] Chen J, Cheng Q, Zhao J, Cui T J 2014 *Prog. Electromagn. Res.* **146** 71
- [16] Ye Y Q, Jin Y, He S L 2014 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 498
- [17] Wang F W, Gong S X, Zhang S, Mu X, Hong T 2012 *Prog. Electromagn. Res.* **25** 248
- [18] Yang H H, Cao X Y, Gao J, Li W, Yuan Z, Shang K 2013 *Prog. Electromagn. Res.* **33** 31
- [19] Wang K, Zhao J, Cheng Q, Dong D S, Cui T J 2014 *Sci. Rep.* **4** 5395

- [20] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Cheng H Y, Xu Z, Zhang A X 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 221110
- [21] Li W H, Zhang J Q, Qu S B, Yuan H Y, Shen Y, Wang D J, Guo M C 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 084101 (in Chi-

nese) [李文惠, 张介秋, 屈绍波, 袁航盈, 沈杨, 王冬骏, 过勐超 2015 物理学报 **64** 084101]

- [22] Cui T J, Qi M Q, Wan X, Zhao J, Cheng Q 2014 *Light: Sci. Appl.* **3** e218

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

Yan Xin<sup>1)2)</sup> Liang Lan-Ju<sup>1)2)</sup>† Zhang Ya-Ting<sup>1)</sup> Ding Xin<sup>1)</sup> Yao Jian-Quan<sup>1)‡</sup>

1) (College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

2) (School of Opto-Electronic Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China)

( Received 22 January 2015; revised manuscript received 26 April 2015 )

### Abstract

In this paper, we propose a flexible, non-directional lowering scattering 1 bit coding metasurface which can significantly reduce the radar cross section (RCS) within an ultra wide terahertz (THz) frequency band. The total thickness of the coding metasurface is only 40.4  $\mu\text{m}$ . The 1 bit coding metasurface is composed of “0” and “1” elements. And the “0” and “1” elements of metasurface are realized separately by a substrate without any metallic covering and that with a square metallic ring covering, the reflection phase difference of the two elements is about 180 degree in a wide THz frequency range. The theoretical, analytical, and simulation results show that the coding metasurfaces simply manipulate electromagnetic waves by coding the “0” and “1” elements in different sequences. Specific coding sequences result in the far-field scattering patterns varying from single beam to two, three, and numerous beams in THz frequencies. The metasurface with the numerous scattering waves can disperse the reflection into a variety of directions for non-periodic coding sequence way, and in each direction the energy is small based on the energy conservation principle. Full-wave simulation results show that the reflectivity less than  $-10$  dB for coding metasurface can be achieved in a wide frequency range from 1–1.4 THz at normal incidence, and the RCS reduction as compared with a bare metallic plate with the same size is essentially more than 10 dB, in agreement with the bandwidth of reflectivity being less than  $-10$  dB; the maximum reduction can be up to 19 dB. The wideband RCS reduction results are consistent with the bandwidth of 180 degrees phase difference between the two elements “0” and “1”. This wideband characteristic of RCS reduction can be kept up as the coding metasurface is wrapped around a metallic cylinder with a diameter of 4 mm. The presented method opens a new way to control THz waves by coding metasurface, so it is of great application values in stealth, imaging, and broadband communications of THz frequencies.

**Keywords:** coding metasurface, non-directional scattering, radar cross section (RCS), terahertz

**PACS:** 81.05.xj, 42.25.Fx, 41.20.Jb, 87.50.U–

**DOI:** 10.7498/aps.64.158101

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61271066), the Science and Technology development Program of Shandong Province (Grant No. J13LN07), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2015M571263), and the high Education Science Technology Program of Shandong Province (Grant No. J15LN36).

† Corresponding author. E-mail: [lianglanju123@163.com](mailto:lianglanju123@163.com)

‡ Corresponding author. E-mail: [jqyao@tju.edu.cn](mailto:jqyao@tju.edu.cn)