

基于编码相位梯度超表面实现太赫兹雷达散射截面缩减

汪静丽^{1*}, 尹亮¹, 董先超¹, 杨志雄¹, 万洪丹¹, 陈鹤鸣², 钟凯³

¹南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210023;

²南京邮电大学贝尔英才学院, 江苏 南京 210023;

³天津大学精密仪器与光电子工程学院, 教育部光电信息技术重点实验室, 天津 300072

摘要 本文设计了一种编码相位梯度超表面,用于实现太赫兹频段的雷达散射截面(RCS)缩减。依据 Pancharatnam-Berry(PB)几何相位原理在超表面单元中引入相位梯度,设计出 1 bit 编码的两个元素“0”和“1”,使得两者的反射相位差接近 180°。通过遗传算法得到编码相位梯度超表面中编码元素的最佳排列,实现了太赫兹波宽带 RCS 缩减。对编码相位梯度超表面进行建模分析,结果表明,在 0.87~1.725 THz 的宽频段内,设计的 1 bit 编码相位梯度超表面能实现大于 10 dB 的 RCS 缩减,最大缩减值达到 31.26 dB。此外,分析了 x 和 y 极化波的入射角度变化对编码相位梯度超表面性能的影响,在 0°~30° 范围内,其性能稳定。以上结果表明,该类超表面在雷达隐身等方面具有潜在的应用价值。

关键词 太赫兹; 雷达散射截面; 编码相位梯度超表面; 编码元素; 排列方式

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS222095

1 引言

雷达散射截面(RCS)是衡量目标雷达回波能力强弱的一个重要物理量,降低目标物体 RCS 值,即实现 RCS 缩减,在雷达隐身领域具有重要的应用前景^[1-2]。太赫兹波(THz)指的是 0.1~10 THz 频率范围内的电磁波,相比于红外和微波,具有低能量、高透射、高分辨率和高信息容量等特征^[3],因而在高速宽带通信、精准军事雷达、高分辨率成像等领域具有广泛的应用空间^[4-5]。随着国际形势的日趋复杂和科技的迅速发展,在 THz 频段实现 RCS 缩减^[6],从而实现该频段的雷达隐身,已经成为新的研究方向。

目前,在 THz 频段最有效且常用的实现 RCS 缩减的方法主要有两种:1)使用完美吸收器^[7-8],其原理是将入射的电磁波能量吸收到表面并转化为内能,使得温度上升;2)利用超表面^[9]在空间域重新塑造 THz 波波形,其主要原理是将反射能量打散到其他方向,以达到在特定的范围内能够更好地降低目标 RCS 的目的。前者存在带宽狭窄、容易被远红外探测器发现等缺点,而后者因其结构简单、尺寸小、工作频段宽等特点,成为研究热点。

超表面是由亚波长尺寸单元周期或非周期排列而

成的人工结构。在 THz 频段,超表面实现 RCS 缩减的方式主要有两种:1)利用相位相消原理^[10],即利用两种相位单元、以棋盘格排列的方式来实现背向散射方向的远场相位相消,实现 RCS 缩减;2)利用漫反射原理^[11],即将具有不同相位的单元随机排列构成超表面,将反射波散射到整个空间域中,实现 RCS 缩减。2014 年,Cui 等^[12]提出了编码超表面的新概念,它比传统的超表面具有更多的自由度。编码超表面可以看作是连接物理世界和数字世界的桥梁,能够实现对电磁波的灵活控制。同年,李勇峰等^[13]提出了一种相位梯度超表面,针对其在雷达隐身技术中的应用,利用表面波耦合原理和异常反射两种机制复合,实现了微波波段宽带 RCS 缩减。因此,本文尝试将编码超表面和相位梯度超表面结合,提出了一种编码相位梯度超表面,利用漫反射原理实现了 THz 宽频段 RCS 缩减。首先,对超表面单元进行优化设计,即在“超级子单元”^[14-15]的基础上引入相位梯度^[16]得到“编码元素”,且在编码排列时将“编码元素”视为编码相位梯度超表面单元进行排列。其次,对编码相位梯度超表面单元的排列方式进行优化,即灵活运用遗传算法^[17]获得最佳排列。正是因为同时优化了影响 RCS 缩减效果的超表面单元和其排列方式,编码相位梯度超表面在 THz 频段内具

收稿日期: 2022-12-05; 修回日期: 2023-01-09; 录用日期: 2023-02-06; 网络首发日期: 2023-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(12174199,61571237)、江苏省自然科学基金(BK20221330,BK20151509)、横向课题多功能太赫兹天线的研究资助项目(2021外 323)

通信作者: *jlwang@njupt.edu.cn

有更优异的宽带 RCS 缩减效果。

2 理论分析

编码相位梯度超表面调控 THz 波主要依据反射阵天线^[18]的基本原理。考虑一 $N \times N$ 个编码元素构成的编码相位梯度超表面,其每个编码元素都是由 $M \times M$ 个引入相位梯度的超表面单元组成(注:对于无相位梯度的编码超表面而言, $M \times M$ 个完全相同的超表

面单元就组成了超级子单元)。对于垂直入射的电磁波,编码相位梯度超表面的远场散射函数表示为

$$F(\theta, \varphi) = f_{m,n}(\theta, \varphi) S_a(\theta, \varphi), \quad (1)$$

式中: θ 和 φ 分别为散射波束的俯仰角和方位角; $f_{m,n}(\theta, \varphi)$ 为编码相位梯度超表面单元的辐射特性; $S_a(\theta, \varphi)$ 为序列方式。其表示为

$$S_a(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \exp\{j[\varphi_{m,n} + k_0 D_x(m-1/2)\sin\theta\cos\varphi + k_0 D_y(n-1/2)\sin\theta\sin\varphi]\}, \quad (2)$$

式中: k_0 为波矢大小; $\varphi_{m,n}$ 为编码相位梯度超表面中每一个编码元素的反射相位; D_x 和 D_y 分别为编码元素沿着 x 方向和 y 方向的尺寸。

对于无相位梯度的编码超表面而言,其操控远场波束时,主要通过设计超级子单元的不同序列方式 $S_a(\theta, \varphi)$ 实现。而编码相位梯度超表面不仅可以改变 $S_a(\theta, \varphi)$, 还可以通过相位梯度的引入改变 $f_{m,n}(\theta, \varphi)$, 从而更加灵活地调控电磁波。本文使用 Pancharatnam-Berry (PB) 几何相位原理^[19] 设计 $f_{m,n}(\theta, \varphi)$, 使用遗传算法^[20] 优化 $S_a(\theta, \varphi)$, 两者结合所设计出的编码相位梯度超表面能够实现 THz 宽频段的 RCS 缩减。

3 超表面单元设计和分析

对编码相位梯度超表面而言,构成它的超表面单元需要具有自由的相位调控能力。依据 PB 几何相位原理,就能够设计出具有不同相位响应的超表面单元,其满足:垂直入射的 x 和 y 极化波,其同极化反射幅度几乎一致,且两者的同极化反射相位差为 180° 。此外,根据文献^[21]可知,当超表面单元结构对 x 极化和 y

极化波相位响应相差为 180° 时,其满足 $1/2$ 波片条件。所以,后续基于 PB 几何相位原理,进行超表面单元的设计中,其本质就是寻找一个高反射系数的 $1/2$ 波片的过程。

本文设计了如图 1(a) 所示的反射型超表面单元。它由三层结构组成:顶层为厚度 $t=0.2 \mu\text{m}$ 的双 Ω 形铜金属贴片,中间为厚度 $h=30 \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺介质层,底部为厚度 $t=0.2 \mu\text{m}$ 的铜金属背板。双 Ω 形的顶层对称结构的设计是为了获得宽带宽的性能,文献调研^[22]表明:如果超表面单元顶层结构具有某个方向上的对称性,则其就可以视为该方向上的偶极子。当 x 或者 y 极化波垂直入射至该超表面单元时,其内部将分别产生磁偶极共振和电偶极共振,而多种共振模式有利于其工作频段的拓宽^[23]。底部铜金属贴片的设计是因为金属底板的存在会导致超表面单元的反射效率较高。此外,铜的电导率为 $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$,聚酰亚胺的介电常数 $\epsilon_r=3.1$,损耗正切 $\tan\sigma=0.05$ 。超表面单元周期 $P=120 \mu\text{m}$ 。如图 1(b) 所示,金属双 Ω 图案的外圆环半径 $R_2=32.5 \mu\text{m}$,内圆环半径 $R_1=22.5 \mu\text{m}$,双 Ω 图案的底边长 $a=65 \mu\text{m}$,两边开口的宽度均为 $d=10 \mu\text{m}$, α 为逆时针旋转角度。

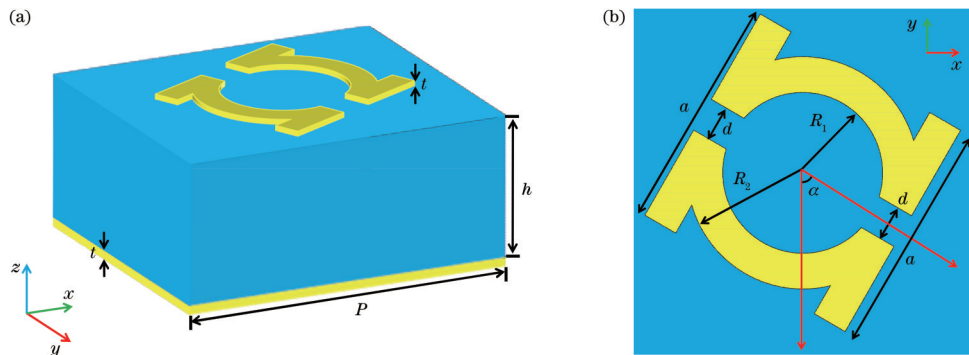


图 1 设计的编码相位梯度超表面单元。(a)主视图;(b)俯视图

Fig. 1 Designed coding phase gradient metasurface unit. (a) Main view; (b) top view

利用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 对超表面单元进行仿真,仿真结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,当分别垂直入射 x 和 y 极化波至超表面单元时,

在 $1 \sim 1.5 \text{ THz}$ 频率范围内,超表面单元的同极化反射振幅均大于 0.8 ,并且两者的相位差接近 180° ,满足 PB 几何相位原理的要求,即所设计的超表面单元可以形

成一个高反射系数的 1/2 波片。

对于反射型的超表面单元,根据 PB 几何相位原理可知:当入射波为圆极化波时,反射波与入射波的极化方式相同。且超表面单元顶层结构旋转角度为 α ,相应地相移为 $\Delta\varphi = \pm 2\alpha$,其中 $-$ 为左旋圆极化波(LCP), $+$ 为右旋圆极化波(RCP)。由于超表面单元在 LCP 或 RCP 入射时表现的特性几乎一致,因此仅以 RCP 入射为例进行分析。当 RCP 波垂直入射时,分别

计算了超表面单元的同极化反射幅度和反射相位,结果如图 3 所示。从图 3(a)可以看出,在 RCP 波垂直入射时,不同旋转角度 α 下的同极化反射幅度基本一致,且在 0.9~1.5 THz 频率范围内均大于 0.8。从图 5(b)可以看出,当旋转角 α 以 30° 步宽从 0° 变为 150° 时,相邻超表面单元的同极化反射相位差均为 60° ,与 PB 几何相位原理符合得很好。因此,能够构造出具有不同相位响应的超表面单元。

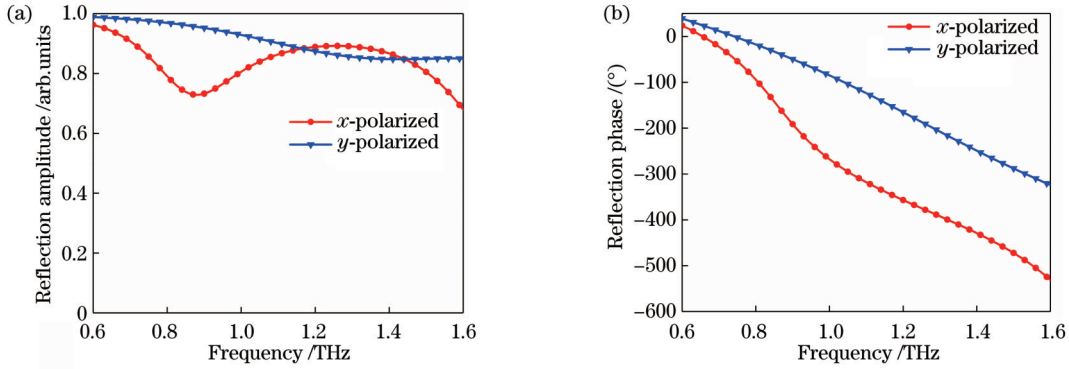


图 2 x 和 y 极化波垂直入射时,编码相位梯度超表面单元的同极化反射率和反射相位。(a)反射率;(b)反射相位

Fig. 2 Reflection amplitude and reflection phase for co-polarization of encoded phase gradient metasurface under normal incidence of the x -polarized and y -polarized waves. (a) Reflection amplitude; (b) reflection phase

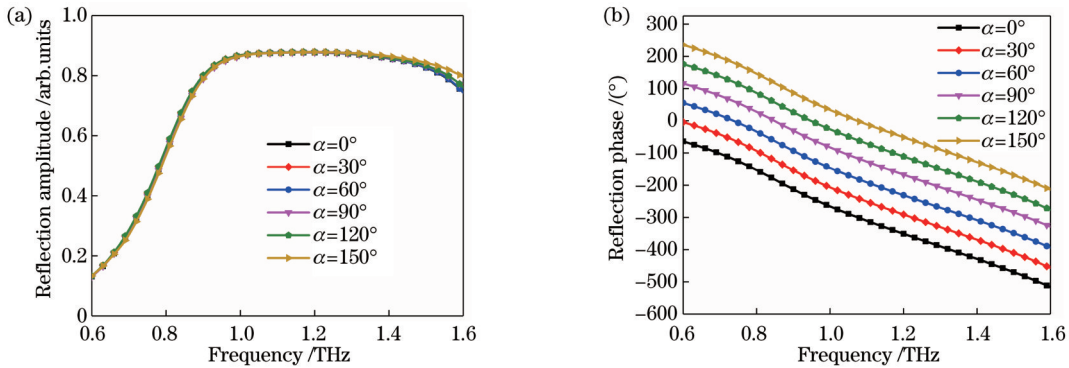


图 3 右旋圆极化波垂直入射时,不同旋转角 α 对应编码相位梯度超表面单元的同极化反射率和反射相位。(a)反射率;(b)反射相位
Fig. 3 Reflection amplitude and reflection phase for co-polarization of encoded phase gradient metasurface under normal incidence of RCP waves with different rotation angle α values. (a) Reflection amplitude; (b) reflection phase

4 编码元素和排列方式的设计

将不同的编码元素按不同的排列方式排列,即可构成各类编码相位梯度超表面,从而应用于各种不同的场合。所以,编码元素和排列方式是决定编码相位梯度超表面性能的关键^[24]。

4.1 编码元素的设计

在前文设计出的超表面单元基础上,本节拟对编码元素进行设计。编码超表面的设计中有时会引入超级子单元,即:将 $M \times M$ 个相同的超表面单元视为一个编码超表面单元进行排列。而所谓编码元素就是在超级子单元的基础上引入相位梯度,且将其视为一个编码相位梯度超表面单元进行排列。

对于编码相位梯度超表面而言,编码元素中超表面单元的个数是 M^2 ,其中 $M = 2\pi/2\alpha = \pi/\alpha$ 。当旋转角 α 过大时, M 将很小,不利于 THz 波束的灵活调控。当旋转角 α 过小时, M 将很大,编码相位梯度超表面的设计和加工均会变得复杂。因此,旋转角 α 需要合理选择,本文拟取 $\alpha = \pi/6$,此时 $M = 6$,编码元素对应的相位梯度为 $\nabla\varphi_x = (\pi/3)/P$ 。如图 4 所示,编码元素“0”和“1”分别由 6×6 个超表面单元组成,且在 x 方向上具有一维相位梯度,在 y 方向相位保持一致。从图 4(a)可以看出,编码元素“0”中,红色实线框内的 6 个超表面单元的旋转角 α 分别为 $0, \pi/6, \pi/3, \pi/2, 2\pi/3, 5\pi/6$,沿 x 方向所对应的一维相位分别为 $0, \pi/3, 2\pi/3, \pi, 4\pi/3, 5\pi/3$ 。此外,将编码元素“0”中的每个超表面单

元顶部结构再逆时针旋转 $\pi/2$, 就能够得到与编码元素“0”相位相差 π 的编码元素“1”, 如图 4(b) 所示。图 4(b) 红色虚线框内的 6 个超表面单元的旋转角 α 分别为 $\pi/2, 2\pi/3, 5\pi/6, \pi, 7\pi/6, 4\pi/3$, 沿 x 方向所对应的一维相位分别为 $\pi, 4\pi/3, 5\pi/3, 0, \pi/3, 2\pi/3$ 。图 4(c) 给出了在 1.2 THz 处, 编码元素“0”和编码元素“1”沿着 x 方向上的 6 个超表面单元相位差。可以看出, 两者的

相位差为 180° , 这是因为编码元素“1”是由编码元素“0”中每个超表面单元顶部结构逆时针旋转 90° 得到, 如图 4(a)、(b) 所示。根据 PB 几何相位原理, 两者相位差为 180° , 符合 1 bit 编码条件。因此设计出 1 bit 编码的两个元素“0”和“1”。类似地, 对于多 bit 编码相位梯度超表面, 可以用同样的方式设计编码元素。

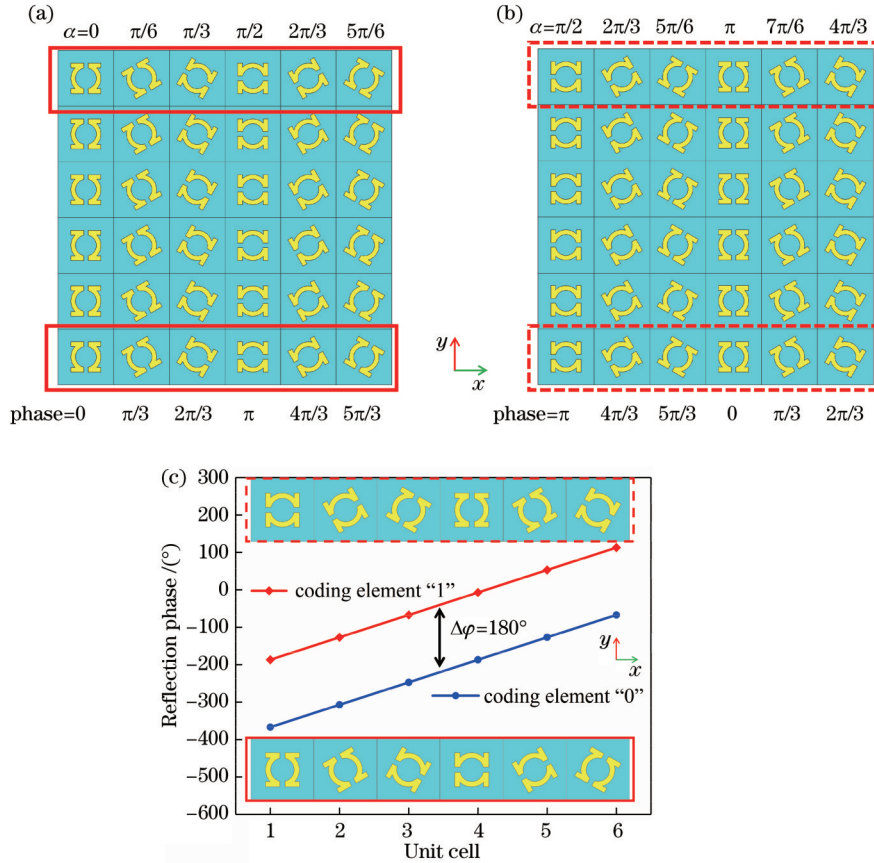


图 4 1 bit 编码元素。(a) 编码元素“0”; (b) 编码元素“1”; (c) 编码元素“0”和编码元素“1”在 1.2 THz 处的相位

Fig. 4 Coding element of 1 bit. (a) Coding element "0"; (b) coding element "1"; (c) reflection phase of coding element "0" and coding element "1" at 1.2 THz

4.2 排列方式的设计

具有随机排列方式的编码超表面可以实现扩散散射, 从而降低 RCS^[25]。与之类似, 将编码元素“0”和“1”随机排列, 亦可降低编码相位梯度超表面的 RCS。为了使漫反射的能量分布更均匀, 获得更好的 RCS 降低效果, 本节使用 Matlab 软件编写遗传算法优化排列方式。根据极化分解^[26]的概念: 一束线极化波可以分解为两束极化正交的圆极化波。因而, 通过对入射的线极化波进行优化得到排列方式, 对圆极化波而言同样具有好的效果。

遗传算法是一种基于生物进化理论和遗传机制进化的随机搜索算法^[27]。在编码相位梯度超表面的排列方式设计中, 将优化目标构造为一个适应度函数来生成一定规模的主染色体。然后对适应度 ($F_{fitness}$) 进行评估, 并进行选择、交叉和变异等一系列遗传操作, 以产

生下一代。经过反复迭代种群, 直到适应度满足计算中的要求, 得到最优解。本文依据遗传算法, 编写了优化排列方式的程序, 图 5 给出了相应的流程图。其主要思路^[28]是: 使用的遗传算法采用二进制编码, 种群规模为 100, 以轮盘赌方法进行淘汰选择, 交叉概率设为 0.9, 变异概率设为 0.07, 迭代次数设为 1000。结合式 (2), 优化的适应度函数为 $F_{fitness} = \max[S_a(\theta, \varphi)]$ 。使用遗传算法经过多次迭代后, 适应度函数收敛到一个最小值, 如图 6(a) 所示, 此时电磁波散射场的空间分布达到最优解。经过 Matlab 建模仿真, 得到优化后的 8×8 排列方式 M1, 如图 6(b) 所示。

5 编码相位梯度超表面性能分析

根据优化后的排列方式 M1 [图 7(b)], 对编码元素“0” [图 7(a)] 和编码元素“1” [图 7(c)] 进行排列, 即

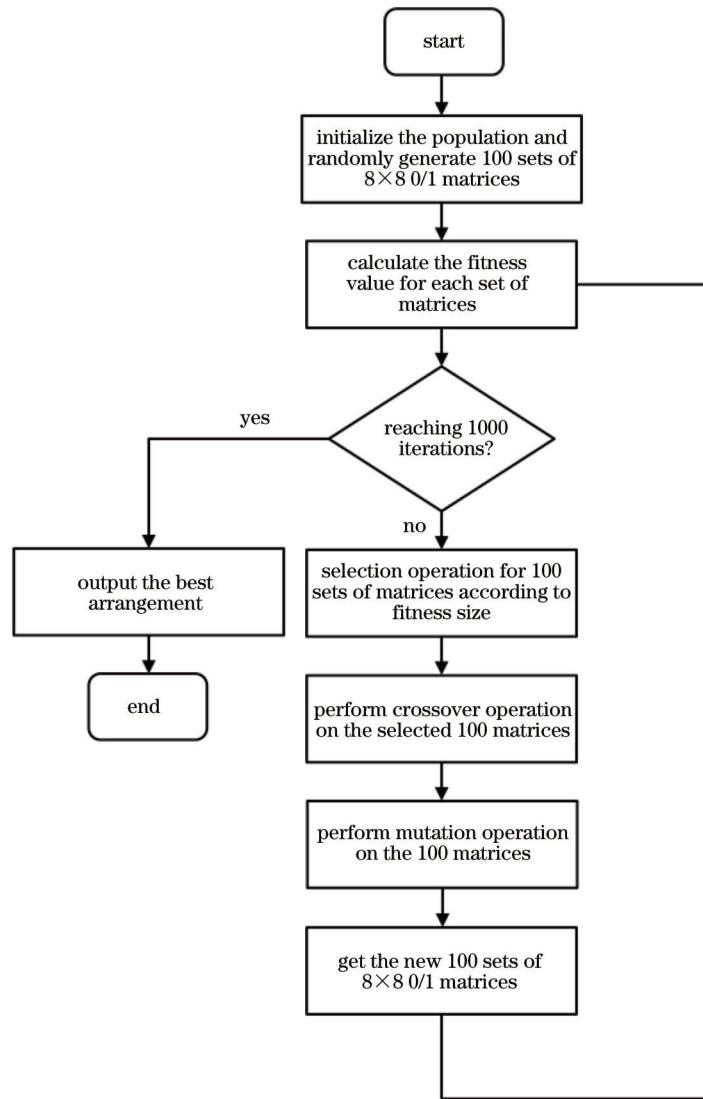


图 5 遗传算法流程图

Fig. 5 Flowchart of genetic algorithm

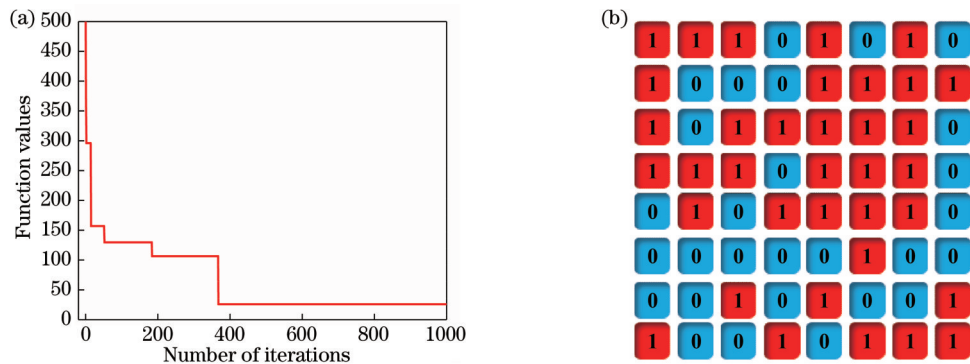


图 6 排列方式的优化。(a)遗传算法的收敛特性;(b)排列方式 M1 示意图

Fig. 6 Design of arrangement. (a) Convergence characteristics of genetic algorithm; (b) schematic diagram of arrangement M1

可得到 48×48 个超表面单元组成的编码相位梯度超表面。

根据设计的编码相位梯度超表面,使用 CST Microwave Studio 软件分别计算了在 1.2 THz 频点处,编码相位梯度超表面在圆极化波和线极化波^[29]垂

直入射下的远场散射,如图 8 所示。对于垂直入射的 RCP 波,其在 $-x$ 方向上产生了漫反射的远场波束,如图 8(a)所示。而对于垂直入射的 LCP 波,其在 $+x$ 方向上产生了漫反射的远场波束,如图 8(b)所示。当 x 极化波或者 y 极化波垂直入射时,如图 8(c)、(d)所示,

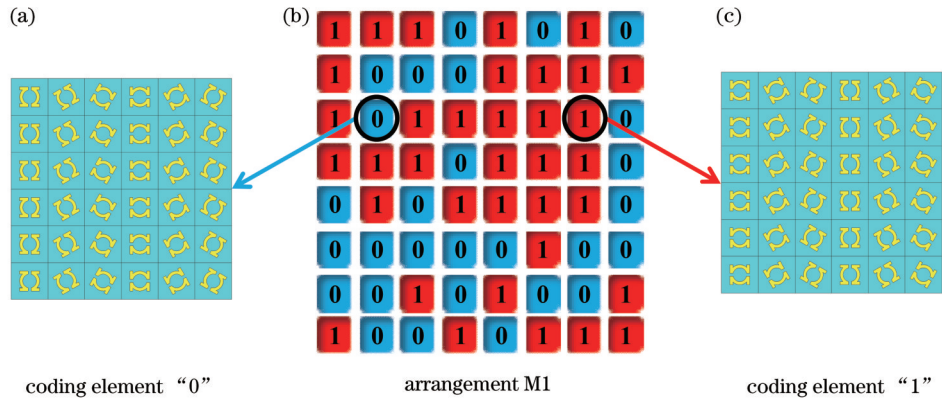


图 7 编码相位梯度超表面示意图。(a)编码元素“0”;(b)排列方式 M1;(c)编码元素“1”

Fig. 7 Schematic diagram of coding phase gradient metasurface. (a) Coding element "0"; (b) arrangement M1; (c) coding element "1"

入射的 x 和 y 极化波可以分解为两束不同方向上的圆极化波,其中 $-x$ 方向为 RCP 波, $+x$ 方向上为 LCP 波。因而可以看出,入射的 x 极化波或者 y 极化波经过编码相位梯度超表面时,漫反射的远场波束将被反射到两个对称主瓣的方向上,并且远场波束同时具有漫

反射和异常反射^[30]两种特征。该散射模式意味着散射场在空间的各个方向受到了极大的抑制,因此在垂直方向上的 RCS 值被大大降低。仿真结果表明,编码相位梯度超表面可以通过将漫反射的远场波束偏离垂直方向来实现 RCS 缩减。

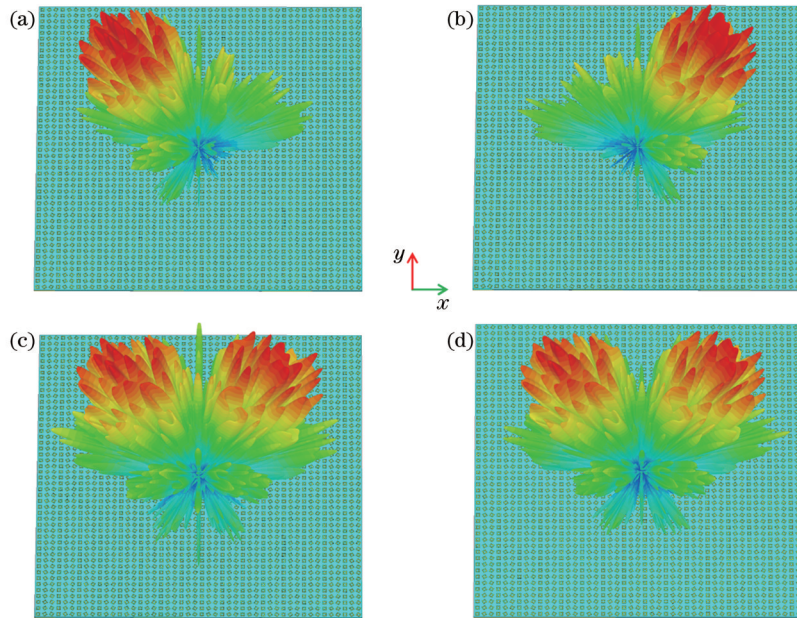


图 8 在频率为 1.2 THz 时,编码相位梯度超表面在不同极化波垂直入射下的远场散射。(a) RCP 波;(b) LCP 波;(c) x 极化波;(d) y 极化波

Fig. 8 Far-field scattering of coding phase gradient metasurface under vertical incidence of different polarized waves at 1.2 THz. (a) RCP wave; (b) LCP wave; (c) x -polarized wave; (d) y -polarized wave

图 9 给出了在 1.0、1.2、1.4、1.6 THz 四个频点处,编码相位梯度超表面在 x 极化和 y 极化波垂直入射下的远场散射图。如图 9(a)~(d) 所示,编码相位梯度超表面在这四个频点处都能够将漫反射的远场波束进一步反射到两个对称主瓣的方向上,从而降低垂直方向上的 RCS 值。因此,从远场散射图能够看出,该编码相位梯度超表面能够实现 THz 宽频段的 RCS 缩减。

为了清晰地表明 x 和 y 极化波垂直入射时,1 bit 编

码相位梯度超表面相对于同等尺寸金属板的 RCS 缩减值,将其结果归纳于图 10。由图 10(a) 可知:编码相位梯度超表面的 RCS 缩减,在 0.87~1.725 THz 的宽频段范围内都达到了 10 dB 以上,相对带宽 $[2(f_H - f_L)/(f_H + f_L)]$,其中, f_H 为工作高频, f_L 为工作低频] 为 65.9%。且在 0.9~1.4 THz 和 1.6~1.7 THz 频率范围内,RCS 缩减达到了 15 dB 以上,最大 RCS 缩减值为 31.26 dB。因此,编码相位梯度超表面能够实现太赫兹

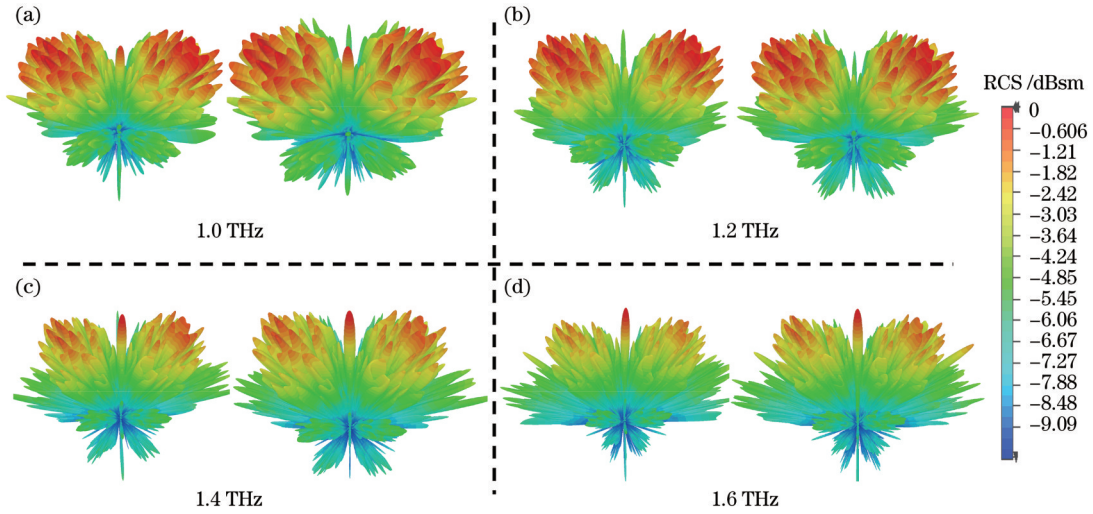


图 9 x 极化波(左)和 y 极化波(右)垂直入射时,编码相位梯度超表面在不同 THz 频率处对应的远场散射。(a) 1.0 THz; (b) 1.2 THz; (c) 1.4 THz; (d) 1.6 THz

Fig. 9 Far-field scattering corresponding to coding phase gradient metasurface at different THz frequencies, under normally incident x -polarized wave(left) and y -polarized wave(right). (a) 1.0 THz; (b) 1.2 THz; (c) 1.4 THz; (d) 1.6 THz

波宽带 RCS 缩减效果。此外,我们将编码相位梯度超表面(由编码元素 0 和 1 按照 M1 排列而成)和普通的无相位梯度的编码超表面(由超级子单元 0 和 1 按照 M1 排列而成)的 RCS 缩减效果进行了对比,结果如图 10 (b)所示。 x 和 y 极化波垂直入射时,在 0.8~1.35 THz 频率范围内,编码相位梯度超表面的 RCS 缩减值大于

普通的无相位梯度的编码超表面,且在 0.95 THz 和 1.225 THz 频点处,前者的 RCS 缩减值分别达到了 29.32 dB 和 31.26 dB。这是由于编码元素内引入了相位梯度,入射波经过超表面时,将被反射到两个主瓣方向上,法线方向反射波束的 RCS 被进一步降低。因此,编码相位梯度超表面具有更好的 RCS 缩减效果。

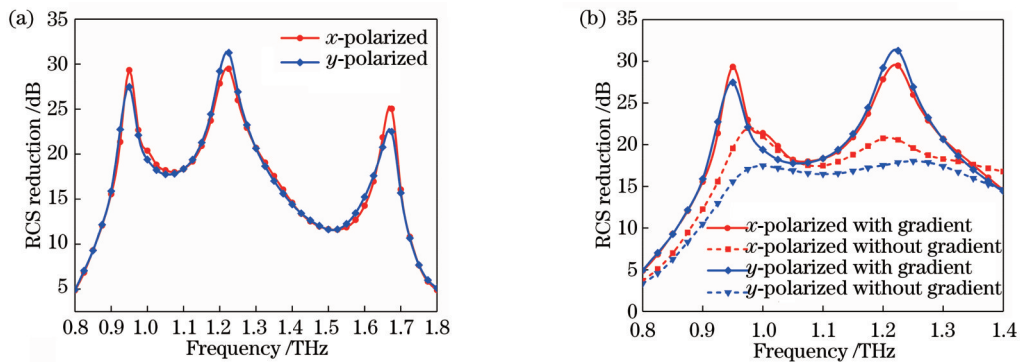


图 10 x 和 y 极化波垂直入射时,超表面相比于同等尺寸金属板的 RCS 缩减值。(a) 编码相位梯度超表面; (b) 编码相位梯度超表面与普通的无相位梯度的编码超表面

Fig. 10 Simulated RCS reduction of designed metasurface compared to the metal plate of the same size under normal incidence of the x -polarized and y -polarized waves. (a) Coding phase gradient metasurface; (b) coding phase gradient metasurface and ordinary coding metasurface without gradient

此外,对大部分的超表面而言,当 x 和 y 极化波入射时,入射角度变化会影响其性能,从而在一定程度上限制了其应用。因此,有必要分析入射角度的变化对所提出的编码相位梯度超表面的影响。图 11 显示了当 x 和 y 极化波入射时,编码相位梯度超表面在不同入射角度时的 RCS 缩减效果。首先,当 x 和 y 极化波垂直入射时(即:入射角为 0°),在 0.87~1.725 THz 频率范围内,其 RCS 缩减值都超过 10 dB。其次,当 x 和 y 极化波的入射角均从 0° 逐渐增加到 30° 时,其分别在

0.9~1.5 THz 以及 0.9~1.7 THz 频率范围内具有 10 dB 以上的 RCS 缩减。这表明编码相位梯度超表面在 x 和 y 极化波入射角度为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围时,在较宽的频率范围内能够获得好的 RCS 缩减效果,具有一定的角度稳定性。然而,当入射角继续增加时,设计的编码相位梯度超表面 RCS 缩减效果将逐渐变差,这说明过大的入射角对 RCS 缩减效果有影响。

将所设计编码相位梯度超表面与已报道的超表面性能参数进行比较,如表 1 所示。由表 1 可知,本文设

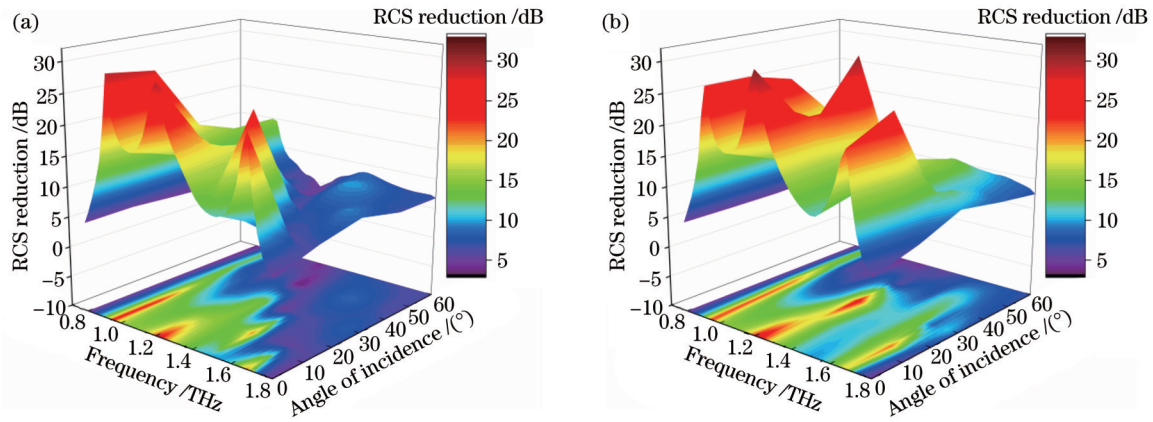
图 11 在不同入射角下,编码相位梯度超表面的 RCS 缩减值。(a) x 极化波;(b) y 极化波Fig. 11 RCS reduction value of coding phase gradient metasurface under different incident angles. (a) x -polarized wave; (b) y -polarized wave

表 1 超表面 RCS 缩减性能的比较

Table 1 Comparison of metasurface RCS reduction performance

Metasurface	Bandwidth /THz	Arrangement	Maximum RCS reduction /dB	Relative bandwidth /%	Angle stability /($^{\circ}$)
Ref. [6]	1.0-1.4	Periodic sequence	19	33	—
Ref. [13]	0.87-1.6	GRS sequence	24.2	59.1	0-20
Ref. [15]	0.85-1.6	Matlab generate sequence	24.1	61.2	—
Ref. [22]	0.8-1.6	Matlab generate sequence	24.4	66.7	—
Proposed method	0.87-1.725	Genetic algorithm	31.26	65.9	0-30

计的编码相位梯度超表面工作频段更宽,为 0.855 THz,相对带宽达到了 65.9%,最大 RCS 缩减值达到了 31.26 dB,且具有较好的角度稳定性。

6 结 论

本文设计了一种编码相位梯度超表面,能够实现太赫兹宽频段的 RCS 缩减。首先,使用 PB 几何相位原理,通过逆时针旋转编码相位梯度超表面单元顶部结构的角,从而在超表面单元中引入相位梯度,设计出 1 bit 编码元素“0”和“1”,结果表明,两者的反射相位差接近 180° 。其次,使用遗传算法优化排列方式,得到编码元素的最佳排列。最后,根据优化后的排列方式对编码元素“0”和“1”进行排列,得到编码相位梯度超表面,实现了太赫兹波的宽带 RCS 缩减。仿真结果表明:编码相位梯度超表面可以通过将漫反射的远场波束偏离垂直方向来实现 RCS 缩减。设计的 1 bit 编码相位梯度超表面可以在 0.87~1.725 THz 频段内实现大于 10 dB 的 RCS 缩减,最大缩减值达到 31.26 dB。此外,分析了 x 和 y 极化波的入射角度变化对编码相位梯度超表面性能的影响,在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内,其性能较为稳定。该类超表面在太赫兹雷达隐身等方面具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

[1] 闫昕,梁兰菊,张雅婷,等.电磁超表面在微波和太赫兹波段

雷达散射截面缩减中的应用研究进展[J].光谱学与光谱分析,2016,36(6):1639-1644.

Yan X, Liang L J, Zhang Y T, et al. Research progress of electromagnetic metasurface used for radar cross section reduction in microwave and terahertz wave[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(6): 1639-1644.

[2] Sun H Y, Gu C Q, Chen X L, et al. Broadband and broad-angle polarization-independent metasurface for radar cross section reduction[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 40782.

[3] Federici J, Moeller L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(11): 111101.

[4] Pawar A Y, Sonawane D D, Erande K B, et al. Terahertz technology and its applications[J]. Drug Invention Today, 2013, 5(2): 157-163.

[5] Nagatsuma T, Ducournau G, Renaud C C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics[J]. Nature Photonics, 2016, 10(6): 371-379.

[6] 闫昕,梁兰菊,张雅婷,等.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[J].物理学报,2015,64(15):158101. Yan X, Liang L J, Zhang Y T, et al. A coding metasurfaces used for wideband radar cross section reduction in terahertz frequencies[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(15): 158101.

[7] Gong C, Zhan M Z, Yang J, et al. Broadband terahertz metamaterial absorber based on sectional asymmetric structures [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 32466.

[8] 黄成成,张永刚,梁兰菊,等.窄/宽带可切换的石墨烯-二氧化钒复合结构太赫兹吸波器[J].光学学报,2022,42(19):1916001. Huang C C, Zhang Y G, Liang L J, et al. Narrow/broad band switchable terahertz absorber based on graphene and vanadium dioxide composite structure[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42 (19): 1916001.

[9] Gao L H, Cheng Q, Yang J, et al. Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces[J]. Light:

- Science & Applications, 2015, 4(9): e324.
- [10] 梁兰菊, 车凯琪, 刘凤收, 等. 太赫兹超表面 RCS 缩减特性研究[J]. 枣庄学院学报, 2017, 34(5): 26-32.
Liang L J, Che K Q, Liu F S, et al. The study of terahertz artificial electromagnetic surface in RCS reduction[J]. Journal of Zaozhuang University, 2017, 34(5): 26-32.
- [11] Moccia M, Koral C, Papari G P, et al. Suboptimal coding metasurfaces for terahertz diffuse scattering[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 11908.
- [12] Cui T J, Qi M Q, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): e218.
- [13] 李勇峰, 张介秋, 屈绍波, 等. 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[J]. 物理学报, 2014, 63(8): 084103.
Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, et al. Design and experimental verification of a two-dimensional phase gradient metasurface used for radar cross section reduction[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(8): 084103.
- [14] Chen L, Ma H L, Song X J, et al. Dual-functional tunable coding metasurface based on saline water substrate[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 2070.
- [15] Li S H, Li J S. Pancharatnam-Berry metasurface for terahertz wave radar cross section reduction[J]. Chinese Physics B, 2019, 28(9): 094210.
- [16] Feng M C, Li Y F, Zheng Q Q, et al. Two-dimensional coding phase gradient metasurface for RCS reduction[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(37): 375103.
- [17] Zhou Y, Zhang G R, Chen H Y, et al. Design of phase gradient coding metasurfaces for broadband wave modulating[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 8672.
- [18] Wu R Y, Shi C B, Liu S, et al. Addition theorem for digital coding metamaterials[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(5): 1701236.
- [19] 郭姣艳, 李文宇, 孙然, 等. 基于双箭头超表面宽带太赫兹涡旋光束的产生[J]. 中国激光, 2021, 48(20): 2014003.
Guo J Y, Li W Y, Sun R, et al. Generation of broadband terahertz vortex beam based on double-arrow metasurface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 2014003.
- [20] Katoch S, Chauhan S S, Kumar V. A review on genetic algorithm: past, present, and future[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(5): 8091-8126.
- [21] 谢智强, 贺炎亮, 王佩佩, 等. 基于 Pancharatnam-Berry 相位超表面的二维光学边缘检测[J]. 物理学报, 2020, 69(1): 014101.
Xie Z Q, He Y L, Wang P P, et al. Two-dimensional optical edge detection based on Pancharatnam-Berry phase metasurface[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(1): 014101.
- [22] Li J S, Yao J Q. Manipulation of terahertz wave using coding Pancharatnam-Berry phase metasurface[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(5): 5900512.
- [23] 杨森, 王佳云, 张婷, 等. 温度电压双可控宽带太赫兹极化转换/吸收超表面[J]. 光学学报, 2022, 42(8): 0824001.
Yang S, Wang J Y, Zhang T, et al. Temperature-voltage Bi-controllable broadband terahertz polarization conversion/absorption metasurface[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0824001.
- [24] Zheng Q Q, Li Y F, Zhang J Q, et al. Wideband, wide-angle coding phase gradient metasurfaces based on Pancharatnam-Berry phase[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 43543.
- [25] Zhang Y, Liang L J, Yang J, et al. Broadband diffuse terahertz wave scattering by flexible metasurface with randomized phase distribution[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 26875.
- [26] 李国强, 施宏宇, 刘康, 等. 基于超表面的多波束多模态太赫兹涡旋波产生[J]. 物理学报, 2021, 70(18): 188701.
Li G Q, Shi H Y, Liu K, et al. Multi-beam multi-mode vortex beams generation based on metasurface in terahertz band[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(18): 188701.
- [27] Wang Z Z, Sobey A, Potuzak T. A comparative review between genetic algorithm use in composite optimisation and the state-of-the-art in evolutionary computation[J]. Composite Structures, 2020, 233: 111739.
- [28] 杨思瑞, 白海清, 鲍骏, 等. 基于回归分析和遗传算法优化的 BP 神经网络熔覆层形貌预测[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(21): 2114002.
Yang S R, Bai H Q, Bao J, et al. Prediction of cladding layer morphology based on BP neural network optimized by regression analysis and genetic algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(21): 2114002.
- [29] Pan Y B, Lan F, Zhang Y X, et al. Dual-band multifunctional coding metasurface with a mingled anisotropic aperture for polarized manipulation in full space[J]. Photonics Research, 2022, 10(2): 416-425.
- [30] Wu T, Zhang H F, Kumaran S, et al. All dielectric metasurfaces for spin-dependent terahertz wavefront control[J]. Photonics Research, 2022, 10(7): 1695-1702.

Radar Cross Section Reduction Based on Coding Phase Gradient Metasurface in Terahertz Frequencies

Wang Jingli^{*}, Yin Liang¹, Dong Xianchao¹, Yang Zhixiong¹, Wan Hongdan¹,
Chen Heming², Zhong Kai³

¹College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China;

²Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China;

³Key Laboratory of Optoelectronics Information Technology (Ministry of Education), School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract

Objective Radar cross section (RCS) is an important physical quantity to measure the radar echo capability of the target. To reduce the RCS value of the target object is to achieve RCS reduction, which has important applications in the field of

radar stealth. Terahertz (THz) waves refer to electromagnetic waves in the frequency range of 0.1–10 THz, which have broad application space in high-speed broadband communication, precision military radar, high-resolution imaging, and other fields. With the increasing complexity of the international situation and the rapid development of science and technology, RCS reduction in the THz band and its application in radar stealth has become a new research direction. Currently, there are two most effective and commonly used methods for RCS reduction in the THz band. The first one is to use a perfect absorber, which can absorb the incident THz waves to the surface and convert them into internal energy. The other is to use a metasurface to reshape the THz wave waveform in the space domain. The former has the disadvantages of narrow bandwidth and easy discovery by far-infrared detectors. The latter has become a hot research topic because of its simple structure, small size, and wide operating frequency band. In this paper, a coding metasurface with more degrees of freedom than the traditional metasurface is adopted. By combining it with a phase gradient metasurface, this paper proposes a coding phase gradient metasurface. Compared with the normal coding metasurface without phase gradient, it has a better RCS reduction effect. Moreover, the coding phase gradient metasurface has a wider working band. This is due to the introduction of a double Ω -shaped symmetrical structure at the top of the metasurface element. The metasurface will generate magnetic dipole resonance and electric dipole resonance in its interior, and the multiple resonance modes are conducive to broadening its working frequency band.

Methods First, according to the Pancharatnam-Berry (PB) geometric phase principle, a number of double Ω -shaped reflective metasurface elements with different phase responses are designed. The conditions they meet are as follows. For the vertically incident x - and y -polarized waves, the amplitudes of the co-polarized reflection are almost the same, and their co-polarized reflection phase difference is 180° . Second, based on the designed metasurface elements, the coding elements are designed. The so-called coding element is the introduction of phase gradient on the basis of the supercell. Third, a genetic algorithm is written using Matlab to optimize the arrangement, so that the energy distribution of diffuse reflection is more uniform, and a better RCS reduction effect is obtained. Then, according to the optimized arrangement, the coding elements 0 and 1 are arranged to obtain the coding phase gradient metasurface. Finally, CST Microwave Studio is used to simulate the far-field scattering of the coding phase gradient metasurface at different frequencies. The RCS reduction value relative to a metal plate of the same size is calculated. In addition, the influence of x - and y -polarized incidence angles on the performance of the coding phase gradient metasurface is also analyzed.

Results and Discussions When the x - and y -polarized waves are incident vertically to the metasurface element, the co-polarization amplitudes are larger than 0.8 in the frequency range from 1 THz to 1.5 THz, and their phase differences are close to 180° , which satisfy the PB geometric phase principle (Fig. 2). Then, the phase gradient is introduced on the basis of supercells, and 1 bit coding elements 0 and 1 are designed (Fig. 4). The optimal arrangement M1 of the coding elements is achieved with the help of the genetic algorithm [Fig. 6(b)]. The coding phase gradient metasurface is obtained by arranging the coding elements according to M1. CST Microwave Studio is used to calculate the far-field scattering of the coding phase gradient metasurface at different frequency points under the normal incidence of x - and y -polarized waves. The result shows that the diffusely reflected scattering waves will be further reflected in the direction of the two symmetrical main lobes, and the far-field beams have both diffuse reflection and abnormal reflection characteristics (Fig. 9). In addition, the results show that the designed 1 bit coding phase gradient metasurface can achieve RCS reduction of more than 10 dB (Fig. 10) in a wide frequency range (0.87–1.725 THz) with a relative bandwidth of 65.9%. The RCS reduction in the frequency range of 0.9–1.4 THz and 1.6–1.7 THz both reaches over 15 dB with a maximum RCS reduction value of 31.26 dB. The RCS reduction effect of the coding phase gradient metasurface (composed of coding elements 0 and 1 arranged according to M1) is compared with that of the normal coding metasurface without phase gradient (composed of supercells 0 and 1 arranged according to M1), and it is found that the RCS reduction effect of the former is better. Finally, when the incident angles of x - and y -polarized waves are both gradually increased from 0° to 30° , the RCS reduction is more than 10 dB in the frequency bands of 0.9–1.5 THz and 0.9–1.7 THz (Fig. 11). It indicates that good RCS reduction effect can be achieved over a wide frequency range with a certain degree of angular stability.

Conclusions In this paper, a coding phase gradient metasurface is proposed, which can reduce the RCS in the THz band. The results show that the designed 1 bit coding phase gradient metasurface can achieve RCS reduction of more than 10 dB in a wide frequency band from 0.87 THz to 1.725 THz, and the maximum reduction value reaches 31.26 dB. Finally, the influence of the incident angles of the x - and the y -polarized waves on the performance of the coding phase gradient metasurface is analyzed. It was found that its performance is stable in the range of 0° to 30° . The above results show that this kind of metasurface has potential application value in radar stealth and other aspects.

Key words terahertz; radar cross section; coding phase gradient metasurface; coding element; arrangement