

文章编号: 2096-1618(2020)04-0419-05

基于相位梯度的多波束超表面的 RCS 缩减研究

周 芹, 杜国宏, 孙筱枫, 邓 伟
(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:设计仿真了一款基于相位梯度的多波束超表面,在 8 ~ 12 GHz 频率范围内,超表面能有效地实现 RCS 缩减。超表面单元采用改进的风车形结构,具有极化不敏感性。当 x 极化波和 y 极化波沿 $-z$ 轴入射时,均可实现 585° 的移相范围。将单元结构在 x 方向上按照相位梯度 $\Delta\varphi_x = 60^\circ$ 排布,在 y 方向上按照相位梯度 $\Delta\varphi_y = 120^\circ$ 排布,构成具有四波束的相位梯度超表面。仿真结果显示,在 8 ~ 12 GHz 频段,该超表面与同尺寸的金属面相比较,最大单站 RCS 缩减为 25 dB,平均单站 RCS 缩减为 15 dB。多波束相位梯度超表面具有波束数量、波束偏移方向的设计灵活性,对电磁波异常反射等特性,可有效缩减后向雷达散射能量,在隐身技术中具有重要的应用价值。

关键词:相位梯度;多波束;RCS 缩减;宽频带

中图分类号:TN926+.21

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcui.2020.04.009

0 引言

电磁超材料,又名新型人工电磁材料,其具有的超常物理特性并不是取决于构成材料的微观尺寸的分子颗粒特性,而是决定于其人工构造的基本单元结构以及单元的空间分布。这种新型人工电磁材料通常是由亚波长尺寸的单元结构在三维空间内周期或非周期排列成三维立体结构,从而得到所需要的电磁参数,可对电磁波的幅度、相位及极化方式^[1-3]等进行调控。人工电磁表面,又名电磁超表面,属于二维的人工电磁材料。它的厚度通常很薄,可远远小于工作波长,具有体积小、剖面低、损耗小的优势,同时也可以实现对电磁波的相位、极化方式、传播模式的灵活调控,因此被广泛应用于电磁学、光学、力学、声学等领域。

相位梯度超表面^[4-5]是一种能调控电磁波传播特性的人工电磁表面。它将具有不同相移的超表面单元结构按照相位梯度排列,在平面内形成各向异性超表面。能对电磁波的波前相位进行一定的操控,因此可以灵活地控制反射波或透射波的传播方向。与传统的光学元件改变波束的传播方向相比,相位梯度超表面只通过改变亚波长单元的结构即可实现对反射波束和透射波束的灵活控制,大大减小了传统光学器件的体积和厚度。相位梯度超表面一经提出就引起了研究者的广泛关注,Cristian E 等^[6]研究了非平坦超表面上相位不连续的折射问题。Li W 等^[7]在超表面单元结构中增加 PIN 二极管,通过控制 PIN 二极管的状态来调节超表面相位的偏移实现波束的偏转,可获得单站

RCS 的缩减。吴晨骏等^[8]采用十字形结构,设计了极化不敏感的相位梯度超表面,能够实现 RCS 的缩减,但其相对带宽较窄。李勇峰等^[9]将开口谐振环结构按照一定的相位梯度排布,设计了一种极化无关相位梯度超表面,使得垂直入射的电磁波耦合成表面波,并且实现了 RCS 缩减。葛晨辰等^[10]通过设计两个开口谐振环实现双频相位梯度超表面,获得低反射率以及 RCS 的缩减

基于改良的十字形双层反射单元,在平面内按照一定的相位梯度排布,设计了一种宽频带 RCS 缩减的相位梯度超表面。

1 广义斯涅耳定律

广义斯涅耳定律^[8]由 Capasso 教授提出,根据广义斯涅耳定律,当超表面单元按照一定的相位梯度排布,可以任意控制反射波束或者透射波束的传播方向。超表面相位突变的引入,表现为两种介质交界面的相位连续性。假设两路径无限接近光路径,则它们之间的相位差为零。即:

$$k_0 n_i \sin(\theta_i) dx + (\varphi + d\varphi) = k_0 n_t \sin(\theta_t) dx + \varphi$$

其中 n_i 、 n_t 分别是光在介质内外的折射率, φ 、 $\varphi + d\varphi$ 分别是两条光路径在介质交界面的相位突变。把交界面的相位梯度设为常数,则广义斯涅耳折射定律为

$$\sin(\theta_t) n_t - \sin(\theta_i) n_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\varphi}{dx}$$

广义斯涅耳反射定律为

$$\sin(\theta_r) n_r - \sin(\theta_i) n_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\varphi}{dx}$$

2 超表面的设计与仿真

2.1 单元结构的设计

单元采用改进的风车形结构,由金属贴片、双层介质板和金属地板组成,图 1 为该单元的基本结构。介质板采用厚度为2 mm的聚四氟乙烯FR-4($\varepsilon_r=2.65$, $\tan\delta=0.001$),两层介质板的表面均有改进的风车形金属贴片。下层介质板上金属贴片的臂长为 L_1 ,臂宽为 w_1 ,上层介质板表面金属贴片的臂长 $L_2=L_1\times k$,臂宽 $w_2=w_1\times k$,其中 k 是常系数,上、下贴片的中间圆孔半径为 R ,单元各个结构参数值如表 1 所示。金属地板采用电导率 $\sigma=5.8\times10^7\text{ S/m}$ 铜箔,该单元结构的周期 $P=15\text{ mm}$,由于单元结构是各向异性的,可通过控制臂长 L_1 和 L_2 来实现单元的相移。

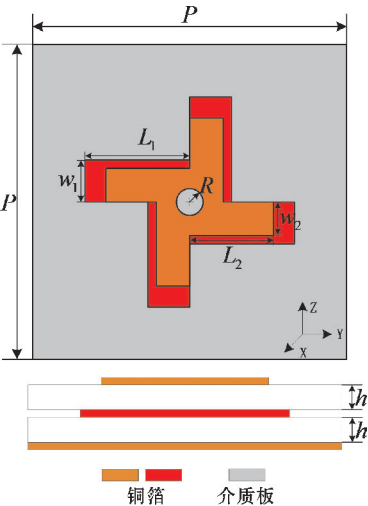


图1 单元的基本结构

表 1 单元结构参数数值表

参数	取值/mm	参数	取值/mm
L_1	5	h	2
L_2	4	R	0.64
w_1	2	P	15
w_2	1.6		

基于有限元高频仿真软件对单元结构进行电磁计算。设置入射电磁波分别为 x 极化和 y 极化,并沿 $-z$ 轴方向垂直入射。通过优化调节单元各结构参数,实现单元的宽带相移。图 2 为反射相位随臂长 L_1 的变化情况。从图 2 可知,该单元的相位变化曲线平滑,相位变化范围达到 585° ,单元幅度不随臂长 L_1 的改变而改变,幅值接近于1。此外,从图 2 中还可以看出 x 极

化波和 y 极化波对应的相位和幅度曲线重合,说明该单元具有极化不敏感特性,所以只讨论 x 极化波入射的情况。不同宽度 w_1 对单元反射相位的影响如图 3 所示,可以看出宽度 w_1 对移相曲线的影响很小,当 L_1 小于4 mm时相位稍微有些偏差,但移相范围和线性度的变化都很小。考虑到反射相位在不同频率下的差异性,分析不同频率对单元反射特性的影响。图 4 为不同频率处反射相位随臂长 L_1 变化的曲线图,可以看出反射相位曲线在不同频率处变化平缓,且相位覆盖范围满足 360° 的要求,可用来实现8~12 GHz的宽频带超表面的设计。

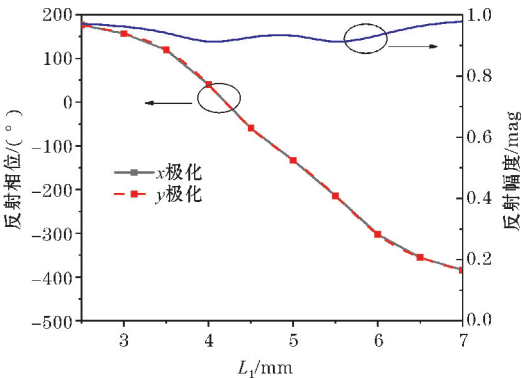


图2 臂长 L_1 对单元的反射系数及反射相位的影响

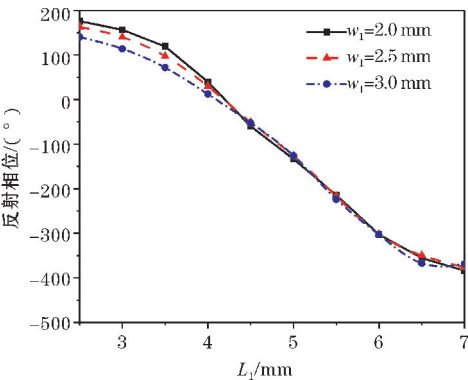


图3 不同臂长 w_1 对反射相位的影响

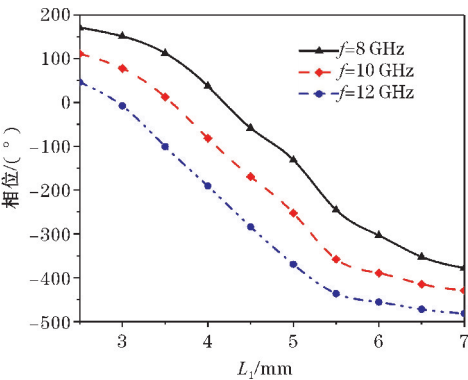


图4 不同频率处的反射相位曲线

2.2 基于相位梯度的多波束超表面设计

多波束超表面的研究可类比多波束天线,馈电形式有单馈源和多馈源,设计方法分为口径场叠加法和几何分区法^[9]。口径场叠加法就是指在每个单元上叠加产生每个波束所需的电场。假设产生 N 个指向不同的波束, (θ_n, φ_n) 为第 n 个波束的辐射方向,则整个平面的口径场分布表式为

$$E(x_i, y_i) = A(x_i, y_i) e^{j\varphi(x_i, y_i)} = \sum_{n=1}^N A_{n,i}(x_i, y_i) e^{j\varphi_{n,i}(x_i, y_i)}$$

式中 (x_i, y_i) 为第 i 个单元的位置坐标, $A_{n,i}(x_i, y_i)$ 和 $\varphi_{n,i}(x_i, y_i)$ 分别为第 i 个单元需要满足的幅度和相位。几何分区法的基本思想是想要产生 N 个波束,就把平面分成 N 个子区域,每个子区域设计一个特定方向的波束,再根据子区域相应的波束方向来设计整个超表面单元结构的分布。

采用几何分区方法设计多波束宽带反射超表面。超表面工作中心频率为 10 GHz,采用角锥喇叭进行单馈源馈电,整个平面大小为 300 mm×300 mm,由 20×20 个单元构成,焦距比为 0.7。要设计四波束相位梯度超表面,因此将平面等分成 4 个子区域,每个子区域均匀分布在 xoy 面的 4 个象限,每个象限各有一个波束。设置 x 方向的相位梯度为 $\Delta\varphi_x = 60^\circ$, y 方向的相位梯度为 $\Delta\varphi_y = 120^\circ$,计算整个平面需要补偿的相位,再由相位推算出对应的单元尺寸,所得的相位梯度超表面结构如图 5 所示。利用电磁仿真软件对超表面结构进行计算,图 6、图 7 为超表面的远场方向图。从图中可以看出,该超表面实现了四波束的偏移,且波束在预设象限内,副瓣幅度明显低于主波束。图 8 为超表面在 8~12 GHz 频率范围内的增益曲线图,增益曲线趋于平滑,最大增益为 16 dBi。由于每个波束只能接收到馈源的 1/4 能量,波束的产生也只能依靠整个平面的 1/4 口径,因此所得的增益相对不高。四波束方位角的理论值用 θ_i 和 φ_i 表示,仿真值用 θ_s 和 φ_s 表示,理论值与仿真值的对比如表 1 所示。从表 1 可看出,仿真结果与理论值相符合,说明利用相位梯度设计多波束超表面是可行的。因此,可根据实际需要设计出任意角度偏移的多波束超表面,这在工程上具有较高的应用价值。

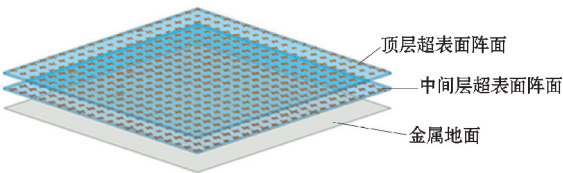


图 5 相位梯度多波束超表面模型图

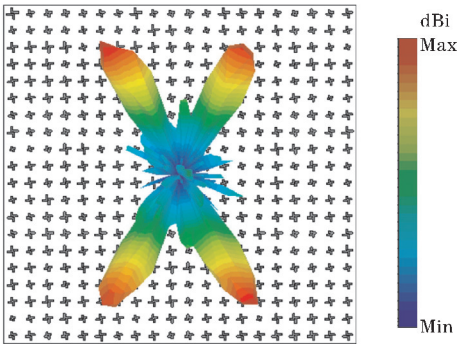


图 6 多波束超表面远场三维方向图

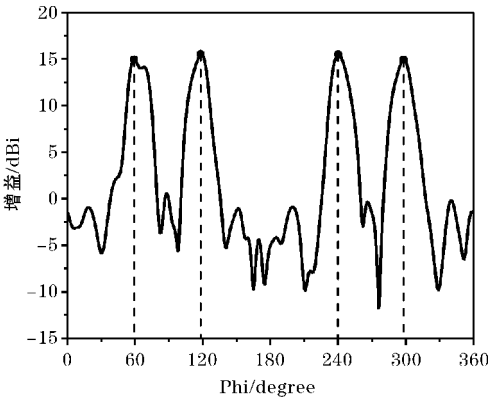


图 7 48°时,多波束超表面远场方向图

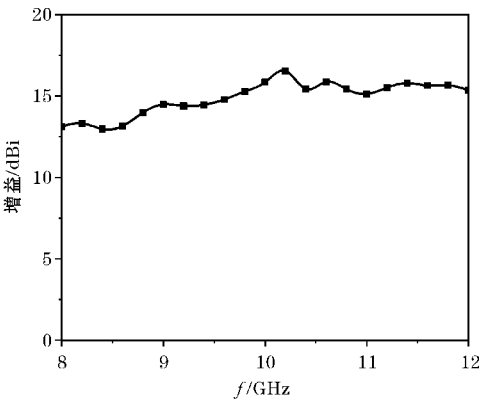


图 8 增益随频率变化曲线

表 2 四波束对应的角度				单位:(°)	
		波束 1	波束 2	波束 3	波束 4
理论值	φ_t	63	117	243	297
	θ_t	48	48	48	48
仿真值	φ_s	59	119	240	299
	θ_s	48	48	48	48

3 多波束超表面用于雷达散射截面缩减

通过在平面的 x, y 方向分别引入相位梯度 $\Delta\varphi_x$ 和 $\Delta\varphi_y$,将渐变的周期单元组成相位梯度超表面。当入射的电磁波到达该超表面时,可以为 x, y 方向入射波

的面内波矢量提供动量补偿,反射波的面内波矢量与入射波的面内波矢量不再相等,从而可将反射波偏转到其他方向。照射到超表面上的电磁波会产生两种情况:一是电磁波频率小于临界频率,此时将出现零反射,入射波将被完美地耦合成表面波,入射电磁波相当于被有效吸收;二是电磁波频率大于临界频率,超表面将发生异常反射,电磁波被反射到其他方向。这两种情况均可减小入射方向的散射能量,从而实现 RCS 的缩减。

当电磁波照射到金属表面时,会在金属表面激发出感应电流,金属表面各处激发的电流相位相同,会使电磁波叠加产生较大的后向散射峰,使得雷达散射截面较大。而设计的多波束超表面能量向 4 个不同方向辐射,因此可大幅缩减雷达散射截面,为缩减目标 RCS 提供了一种有效的方法。图 8 为设计的多波束超表面与同尺寸金属在电磁波垂直入射时的单站 RCS 对比图。在 8 ~ 12 GHz 频率范围内,单站 RCS 均有不同程度的减小。图 9 为电磁波垂直入射时,超表面相对于金属面的 RCS 缩减量。从图中可以明显的看出, RCS 平均缩减量均在 15 dB 以上,其中 9 ~ 10 GHz 频段内缩减量达到 25 dB。说明该超表面可在宽频带内实现 RCS 缩减。

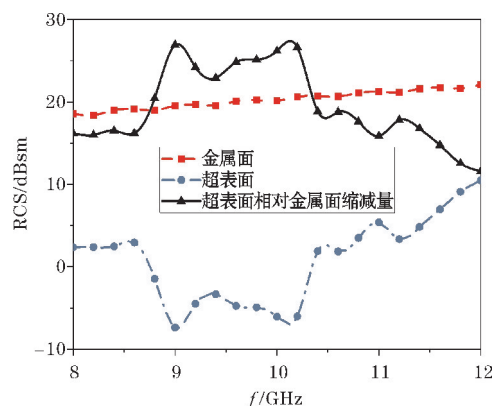


图9 超表面与金属面的单站 RCS、超表面相对于金属面的单站 RCS 缩减量曲线图

4 结论

基于人工电磁表面仿真设计了 RCS 缩减的多波束超表面,该多波束超表面设计采用相位梯度的方法,实现了超表面在宽频带范围内对 RCS 缩减。超材料单元结构为改进的风车形状,在 8 ~ 12 GHz 内单元的相位变化曲线平滑,且相位变化范围达到 585°。利用该单元结构设计四波束超表面,与相同尺寸的平板

金属比较,具有显著的 RCS 缩减。文中设计的四波束超表面在 8 ~ 12 GHz 中最大单站 RCS 缩减达到 25 dB,平均单站 RCS 缩减为 15 dB,具有宽频带 RCS 缩减的效果。文中的设计研究,对提高超表面 RCS 缩减具有参考作用。

致谢:感谢东南大学毫米波国家重点实验室开放课题(K201905)对本文的资助

参考文献:

- [1] Cui L, Wang W, Ding G, et al. Polarization-dependent bi-functional metasurface for directive radiation and diffusion-like scattering [J]. Aip Advances, 2017, 7(11):115-214.
- [2] Fang C, Cheng Y, He Z, et al. Design of a wide-band reflective linear polarization converter based on the ladder-shaped structure metasurface [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2017, 137:148-155.
- [3] Li T, Hu X, Chen H, et al. Metallic metasurfaces for high efficient polarization conversion control in transmission mode [J]. Optics Express, 2017, 25(20):23597-23604.
- [4] Sun Y Y, Han L, Shi X Y, et al. General laws of reflection and refraction for metasurface with phase discontinuity [J]. College Physics, 2013, 62(10):104201-104209.
- [5] Vallecchi A, Hubert S, Schuchinsky A, et al. Phase gradient discontinuity metasurface with intertwined spiral arrays [C]. 2016 10th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS). IEEE, 2016.
- [6] Cristian E Gutiérrez, Stachura E, Pallucchini L. General refraction problems with phase discontinuities on nonflat metasurfaces [J]. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2017, 34(7):1160-1172.
- [7] Li W, Xia S, Li Z R, et al. PIN tuned phase-gradient-metasurface transmitarray for beam steering application [C]. International Symposium on Antennas. IEEE, 2017.
- [8] 吴晨骏,程用志,王文颖,等.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

- [J]. 物理学报,2015,64(16):214–218.
- [9] 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):149–155.
- [10] 葛晨辰,程用志,王鲜,等. 双频带相位梯度超表面设计与 RCS 缩减验证[J]. 微波学报,2017(1):36–40.

Study of RCS Reduction of Multi-beam Metasurface based on Phase Gradient

ZHOU Qin, DU Guohong, SUN Xiaofeng, DENG Wei

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: A multi-beam metasurface based on phase gradient has been simulated and designed in this paper, which can effectively reduce RCS in the frequency range of 8–12 GHz. The metasurface element adopts an improved windmill structure, and it has polarization insensitivity. When x-polarized wave and y-polarized wave are incident along the-z axis, it can realize 585° phase shift. The element structures are arranged according to the phase gradient of $\Delta\varphi_x = 60^\circ$ in the x direction and the phase gradient of $\Delta\varphi_y = 120^\circ$ in the y direction to form a phase gradient metasurface with four beams. The simulation results show that the maximum monostatic RCS is reduced to 25 dB and the average monostatic RCS is reduced to 15 dB compared to the metal surface of the same size within 8–12 GHz. Multi-beam phase gradient metasurface has flexible designs in beam number and beam offset direction. Due to abnormal reflection phenomenon, it can effectively reduce backscattering energy of radar and has important application value in stealth technology.

Keywords: phase gradient; multi-beam; RCS reduction; broadband