

一种基于相位梯度原理的反射型电磁超表面及RCS缩减应用



赵浥彤, 张文琦, 周健, 相倩

中国航空研究院, 北京 100029

摘要:针对电磁波束调控和电磁隐身问题,本文设计了一种在圆形贴片上开口十字缝隙形式的反射型相位梯度超表面,通过对单元尺寸的调节实现了差异的反射相位覆盖,该系列超表面作用于X波段,按照线性、等相位差形式排布超表面单元能够将反射波最大散射方向偏转至关注角域以外,且通过对相位梯度数值的人为设计,能够精确控制最大散射方向,降低单站后向散射的同时兼顾了降低关注角域内的双站散射,具备针对单站雷达截面积(RCS)减缩、双站RCS散射方向调控的能力,且单元结构采用对称设计方式,具有极化不敏感的特性,基于此相位梯度超表面设计了一维、二维相位梯度超表面阵列结构,一维阵列结构的频带内单站RCS峰值减缩了41.13dB,均值减缩了8.7dB,面内最大散射方向偏转了16.5°;二维阵列结构的频带内单站RCS峰值减缩了16.29dB,均值减缩了9.04dB,最大散射方向发生了俯仰23°、方位135°偏转,均具备较好的单站和双站雷达隐身效果。

关键词:左手材料;电磁超表面;相位梯度超表面;雷达截面积;斯涅尔定理

中图分类号:TN015

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.04.008

电磁超材料是近年来兴起的具有自然界中材料不具备的超长物理特性的人工复合材料或结构。依据材料对电磁场的响应关系,一般用介电常数和磁导率来衡量,这两个参数也表征了电磁材料的本构特性,如果以介电常数和磁导率建立正交的坐标系来描述材料的电磁特性,那么就可以依据参数的正负性将材料分为左手材料、右手材料、电负材料和磁负材料。自然界中的天然材料通常是介电常数和磁导率均为正值的材料,也就是右手材料,而人为设计的电磁超材料能够使介电常数和磁导率出现负值的情况,也就出现了左手材料、电负材料和磁负材料,这些材料的出现拓展了原本天然材料有限的参数范围,运用电磁超材料能够产生一些超乎常理的自然现象,对电磁波的响应和控制更为丰富,为工程设计人员提供了更广阔的材料选择空间和解决问题的新思路。通常情况下电磁超材料是指介电常数和磁导率均为负数的左手材料,与常规的右手材料电磁特性相反,它能够产生负折射、完美透镜等奇异物理现象。电磁超表面是一种更为简单的电磁超材料形式,通常为亚波长厚度的薄层二维平面结构形式,由

于其结构形式简单易实现,已经被广泛应用到波前调控、极化调控、电磁吸收和透镜等多个应用领域^[1-2],由此也产生了极化转换超表面、人工磁导体、吸波体、相位梯度超表面等诸多电磁超材料类型。

相位梯度超表面(PGM)是近年来新兴的一种超表面形式,通常采用非周期各向异性亚波长结构组合形式,电磁波传播至其表面时,可以通过人工设计方式在其表面各局部位置加入不同的相位变化,进而改变电磁波传输的波面与波前,实现对波束指向的调控,设计的相位梯度超表面组合形式遵循广义斯涅尔定理。在应用方面,如异常反射与折射、表面波耦合、波束聚焦、涡旋波束均可以由相位梯度超表面来实现,设计时相位梯度超表面主要调控透射反射波的相位数值,这些均可以由人工调节超表面局部尺寸、参数等方式实现,再根据广义斯涅尔对不同单元的排布形式进行设计,即可达到设计需求,具有很大的设计空间,并且方法简单、可设计性强。2011年国外学者Genevet等^[3-4]首次提出了广义斯涅尔定律的概念,推导了广义的斯涅尔折射定理和斯涅尔反射定理,并设计了V形单元结构形式,通

收稿日期: 2023-09-21; 退修日期: 2024-01-05; 录用日期: 2024-02-05

引用格式: Zhao Yitong, Zhang Wenqi, Zhou Jian, et al. A reflective electromagnetic metasurface based on phase gradient principle and RCS reduction application[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(04): 60-66. 赵浥彤, 张文琦, 周健, 等. 一种基于相位梯度原理的反射型电磁超表面及RCS缩减应用[J]. 航空科学技术, 2024, 35(04): 60-66.

过调节V形双臂的长度和夹角实现了相位的360°覆盖调控,将8种相位单元沿等相位差规律排布形成周期性阵列的8个单元结构进行周期分布,进而在介质表面形成了相位规律突变,最终实现了电磁波的异常折射与反射。2012年复旦大学He Qiong等^[5]设计了一种H形反射式单元结构,通过调节H形单元的结构参数尺寸,覆盖了360°反射相位调节,并在一维方向上按照相位线性的规律排布,形成了反射式相位梯度超表面,实现了宽带的异常反射。2021年重庆邮电大学汪竹等^[6]设计了一种透射式多层环形单元结构形式超表面,通过调节单元结构尺寸覆盖360°相位调节,并依据相位梯度原理将超表面单元在二维平面结构内梯度分布,实现了Ku波段的平面波的波束聚焦。

在电磁隐身领域相位梯度超表面由于自身具备波前调控的特性,因此加载超表面后能够改变目标原本的散射特性,可以实现如强后向散射偏转、散射方向角域调控、电磁散射隐身真假等功能,对目标的单站雷达截面积(RCS)缩减、关注角域双站RCS控制、电磁诱饵RCS设计等实际应用需求具有较高的匹配适用性。2014年空军工程大学李勇峰等^[7]设计了一种反射式开口谐振环单元结构形式,通过调节开口谐振环的长度,覆盖360°反射相位,形成反射式相位梯度超表面,并将其应用到电磁隐身领域,取得了宽带RCS缩减的效果。2015年华中科技大学吴晨骏等^[8]设计了一种十字贴片单元结构形式,通过调节十字贴片单元的长和宽,覆盖了360°反射相位调节,并在两个方向上按照线性规律排布单元,实现了宽角域的RCS缩减。2018年西安电子科技大学刘英等^[9]设计了一种反射式耶路撒冷十字形相位梯度超表面,通过调节十字形单元边长,覆盖360°反射相位调节,并人为控制单元间的反射相位梯度数值,实现了自由空间波到表面波的耦合,并将其加载到缝隙阵列天线表面,实现了不改变天线辐射特性的同时,降低天线结构项RCS,提出了一种全新的射频隐身思路。2019年西南交通大学雷雪等^[10]设计了一种反射型方框式相位梯度超表面,通过调节方框各边边长,覆盖360°反射相位,并将其按照线性相位梯度规律排布在钝金属二面内表面,成功地实现了后向单站RCS的散射增强,为电磁诱饵设计提供了一种新思路。2022年西安科技大学张威虎等^[11]设计了一种反射式“弯工”形相位梯度超表面单元结构,且单元具有极化转换特性,通过旋转单元的方式,覆盖360°反射相位,并将其在一维方向上按照线性相位的规律进行排布,实现了对于线极化波和圆极化波反射波指向的异常偏转,起到了降低宽带RCS的效果。

本文依据相位梯度原理,设计了一组作用于X波段的相位梯度超表面,并通过对该组超表面的一维和二维阵列排布,实现了单站RCS减缩和双站RCS最大散射方向调控的作用。

1 相位梯度超表面理论分析与设计

费马原理(Fermat's principle)指出,光的传播路径沿着光程取极值的路径,对于电磁波而言可以表述为电磁波的传播路径沿着相位变化取极值的路径,由费马原理可以推导出狭义的斯涅尔定理,狭义斯涅尔定律(Snell's law)认为,影响光和电磁波传播的因素仅有介质,光和电磁波在材料分界面处的反射角和折射角的大小取决于其在两类介质中传播速度或者折射率,但传播速度或折射率是物质的本构属性,由其本构参数决定,且其假设物质在分界面处是理想、连续的,因此光和电磁波的指向严格遵循狭义斯涅尔定律,无法对光和电磁波进行操控。直到2011年哈佛大学课题组提出一系列V形结构的电磁超表面,在材料分界面处布置各向异性的电磁超表面使得分界面处的相位发生了突变,这种相位突变不同于电磁波沿着某一路径传播一段距离积累的空间相位,而是在某点某处直接增加或减少一个相位数值,经过测试发现电磁波的传播路径发生了变化,不再符合狭义的斯涅尔定理,由于相位突变的出现,则需要回归费马原理的本质来判断电磁波的传播路径,在传播路径总的光程或相位累积中加入相位突变项。该课题组经过理论分析推导出了广义的斯涅尔定理。

1.1 广义斯涅尔定理

对于一维的情况,指电磁波在二维平面内传播,相位突变仅发生在一个维度,假设电磁波传播在球坐标系下 $\varphi = 0$ 平面内,电磁波入射角、折射角和反射角可以表示为 θ_i 、 θ_t 和 θ_r ,如果相位突变发生在 x 方向,即相位梯度超表面沿 x 方向线性梯度排布,那么则满足式(1)和式(2)两个基本等式,即一维的广义斯涅尔反射定律和折射定律

$$k_0 n_i (\sin \theta_r - \sin \theta_i) = \frac{d\varphi}{dx} \quad (1)$$

$$k_0 n_i \sin \theta_t - k_0 n_i \sin \theta_i = \frac{d\varphi}{dx} \quad (2)$$

式中, k_0 为自由空间波数($k_0 = 2\pi/\lambda_0$); n_t 、 n_i 分别为折射介质和入射介质的折射率; $\frac{d\varphi}{dx}$ 表示沿 x 方向单位距离的相位变化,即相位梯度。

对于二维的情况,电磁波在三维空间内传播,相位突变发生在两个维度,即电磁波传播发生在球坐标系下任意的 θ 、 φ 方向,电磁波入射角、折射角和反射角可以表示为 θ_i/φ_i 、 θ_t/φ_t 、 θ_r/φ_r 。

和 θ_i/φ_i ,如果相位突变发生在 x 和 y 方向,即相位梯度超表面沿 x 和 y 方向均按照线性梯度排布,则满足式(3)和式(4)两个基本等式,即二维的广义斯涅尔反射定律和折射定律

$$k_0 n_i (\sin \theta_r \cos \varphi_r - \sin \theta_i \cos \varphi_i) = -\frac{d\varphi}{dx} \quad (3)$$

$$k_0 n_i (\sin \theta_r \sin \varphi_r - \sin \theta_i \sin \varphi_i) = -\frac{d\varphi}{dy}$$

$$k_0 n_i (\sin \theta_t \cos \varphi_t - \sin \theta_i \cos \varphi_i) = -\frac{d\varphi}{dx} \quad (4)$$

$$k_0 n_i (\sin \theta_t \sin \varphi_t - \sin \theta_i \sin \varphi_i) = -\frac{d\varphi}{dy}$$

式中, x,y 向相位梯度分别为 $\frac{d\varphi}{dx}$ 和 $\frac{d\varphi}{dy}$ 。

由式(1)~式(4)可以看出,对于反射和折射的角度与表面的相位梯度有关,与狭义的斯涅尔定律有着本质的不同,可以通过人为制造表面相位的不连续而实现对折射、反射波束波前的操控,为电磁波调控设计提供了理论依据。

1.2 超表面单元设计

基于以上理论,考虑电磁隐身领域RCS缩减方面的应用,设计了一组作用于X波段的反射型相位梯度超表面,选取了在圆形贴片上开孔十字缝隙的平面结构形式,这种结构方式能够使超表面尺寸参数较少、反射相位覆盖范围较大,便于工程中参数化建模与仿真优化,该系列超表面设计参考为X波段中心频点10GHz,能够实现单元的反射相位覆盖 $0^\circ \sim 360^\circ$ 相位范围,超表面单元由上层金属贴片、中介介质基板和底层金属反射板组成。其中上层由金属贴片采用圆形金属片并在中间开十字缝隙的形式,贴片厚度为0.017mm,单元周期为18mm,中介介质基板厚度为3.556mm,材质为rogers5880,介电常数实部2.2,损耗角正切0.0009,在最下层的金属反射板材质为铜,厚度为0.017mm。为了便于参数化仿真并控制变量数量,限定上层圆形金属贴片的半径为十字开缝宽度的5倍,十字开缝的长度小于金属圆半径0.5mm,通过改变金属圆的半径大小以获得不同的反射相位。单元结构示意图如图1所示。

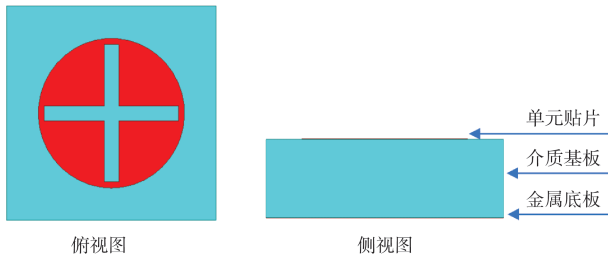


图1 超表面结构示意图

Fig.1 Metasurface structures

对设计的单元进行电磁仿真和参数化扫描,可得到其在 x 极化和 y 极化下的反射特性如图2和图3所示,可以看出,不同的单元尺寸可以实现不同的反射相位,并且反射相位能够覆盖 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围,且反射系数均大于0.99,另外在两种极化的反射幅度和相位基本一致,这是由单元的对称性决定的,因此具有极化不敏感特性。

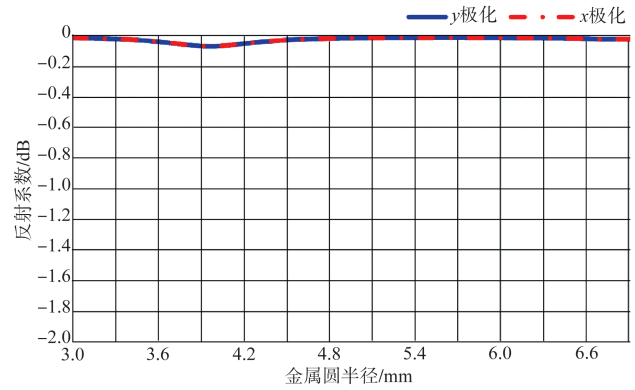


图2 超表面单元反射幅度特性

Fig.2 Reflections amplitude characterization of metasurface

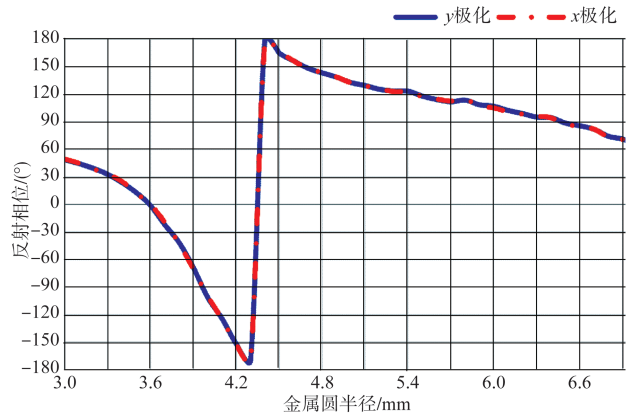


图3 超表面单元反射相位特性

Fig.3 Reflections phase characterization of metasurface

2 相位梯度超表面阵列设计

结合1.1节中理论的分析可知,如果通过人为的方式使表面上不同位置的相位发生突变,就可以改变电磁波的波前,其偏折角度满足式(1)~式(4)中的关系,因此可以选取尺寸不同的单元将其按照一定的线性相位差关系排列,来获得相位梯度,进而使波束发生偏折,偏折角度可由式(1)~式(4)计算得出。这里根据上文仿真得到的超表面单元反射特性,选取6种尺寸的单元形式,每种单元对应一个反射相位,单元间相位差保持恒定数值,且6种单元相位覆盖 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的周期范围,因此相位差为 60° ,选取的单元与反射相位的关系

见表1,选取的单元在X波段的反射幅值与相位如图4与图5所示,可见在整个X波段范围内6种单元相位变化均呈线性规律趋势,在中心频点左右1GHz频率范围内相位差保持近似恒定的关系,能够起到波束调控的作用,将最大散射方向偏转至预定角度,同时降低单站RCS,在X波段边缘频点(如8GHz和12GHz)附近,单元的相位变化趋势一致,相位差较难满足恒定的条件,波束指向不可控,但各单元反射相位不同,最终散射场也会低于各单元等幅同相时的散射场,因此可以起到降低单站RCS的作用。将6种单元按照线性相位梯度规律排列成相位梯度子阵,以用于后续大阵列排布的设计。

表1 相位梯度超表面尺寸与反射相位关系

Table 1 Correlation between size and reflection phase for phase gradient metasurface

编号	1	2	3	4	5	6
圆环半径/mm	4.29	4.02	3.82	3.52	6.91	5.07
反射相位/(°)	-170	-110	-50	10	70	130

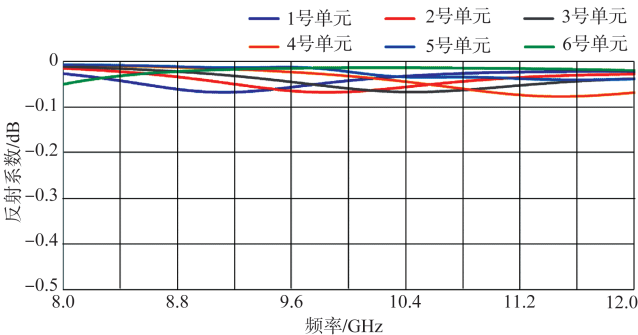


图4 选取各单元反射幅度特性

Fig.4 Reflected amplitude characteristics of selected metasurfaces

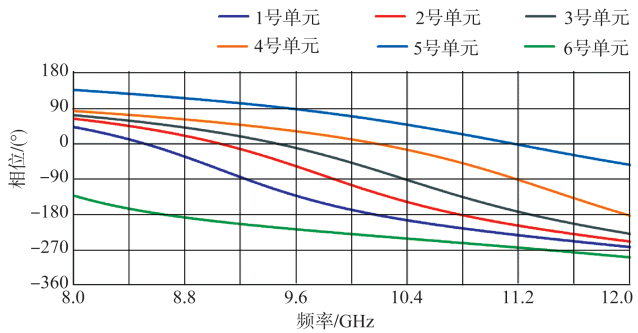


图5 选取各单元反射相位特性

Fig.5 Reflected phase characteristics of selected metasurfaces

2.1 一维阵列设计

对于一维阵列的情况,是指仅在一个方向上设计梯度

变化的相位,即相位梯度子阵的梯度仅在一个方向上排列,另外一个方向上同一位置以连续复制的方式布置单元。这里将上文设计的子阵布置在y轴正方向,且相位线性增加,再将子阵沿y轴扩展1个子阵周期,x方向复制12个周期;超表面144个单元,阵列整体尺寸为180mm×180mm。最终排布的阵列形式如图6所示,图中箭头方向指向相位梯度的方向。

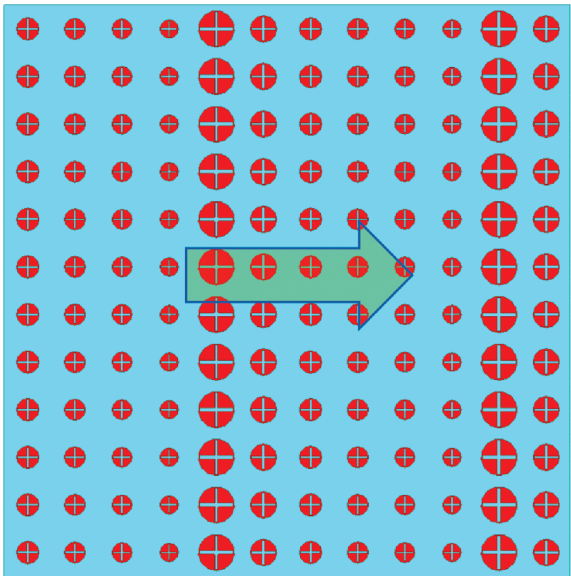


图6 一维相位梯度超表面阵列排布

Fig.6 1D phase gradient metasurface array alignment

通过式(1)计算可以得出,对于上述设计的一维梯度阵面排列形式,最大反射方向发生在 $\theta=16.13^\circ$ 。

2.2 二维阵列设计

对于二维的情况,是指在正交的两个方向上设计梯度变化的相位,即相位梯度子阵的梯度在两个方向上排列,距离参考点两个方向上位置的变化均引入相位变化。这里将上文设计的超表面单元排列在直角坐标系的x和y轴方向,沿x轴正向相位线性增加,沿y轴正向相位线性减少,两个方向上各排布12个超表面单元,共包含144个单元,阵列整体尺寸为180mm×180mm。

最终排布的阵列形式如图7所示,图中箭头方向指向相位梯度的方向。

通过式(3)计算可以得出,对于上述设计的二维梯度阵面排列形式,最大反射方向发生在 $\theta=23.13^\circ$ 、 $\varphi=135^\circ$ 。

3 性能验证与对比

对设计的一维和二维相位梯度超表面阵列进行电磁仿

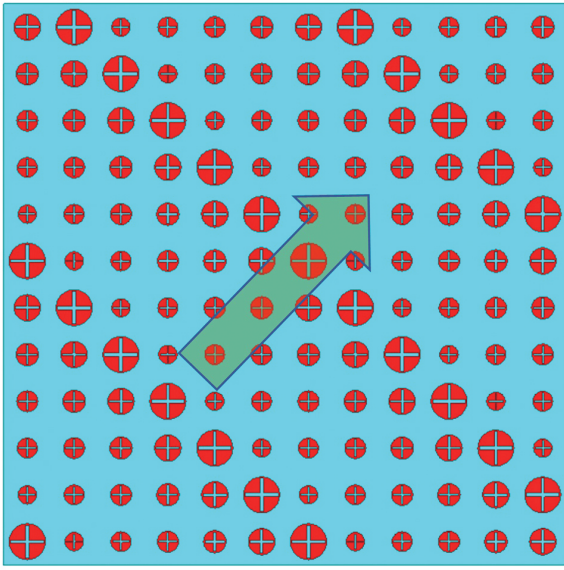


图7 二维相位梯度超表面阵列排布

Fig.7 2D phase gradient metasurface array alignment

真,入射波设置为平面波,由于单元具有极化不敏感性,这里以 y 极化形式进行表征。对于单站RCS仿真垂直入射,频率范围为8~12GHz,对于双站RCS仿真垂直入射,10GHz单频点,接收角域为半自由空间(θ 为 $0^\circ \sim 90^\circ$, φ 为 $0^\circ \sim 360^\circ$)。单站、双站RCS曲线如图8~图11所示,其中双站RCS取发生最大散射的方位切面作图示意。

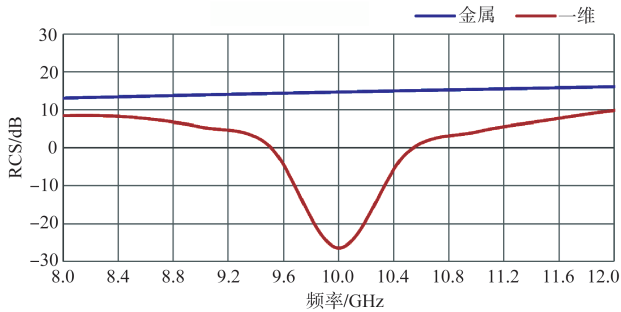


图8 一维相位梯度超表面单站RCS仿真结果

Fig.8 1D phase gradient metasurface monostatic RCS simulation results

一维和二维相位梯度超表面阵列均能够在X波段实现宽带单站RCS的减缩,一维阵列RCS最大减缩值为41.13dB,频带内RCS减缩均值为8.7dB,二维阵列RCS最大减缩值为16.29dB,频带内RCS减缩均值为9.04dB。

在10GHz频点下,一维和二维相位梯度超表面阵列最大散射方向分别为 $\theta=16.1^\circ$ 、 $\varphi=270^\circ$, $\theta=23.1^\circ$ 、 $\varphi=135^\circ$,与理论公式计算结果高度吻合,实现了最大散射方向的偏转。仿真结果统计汇总见表2。

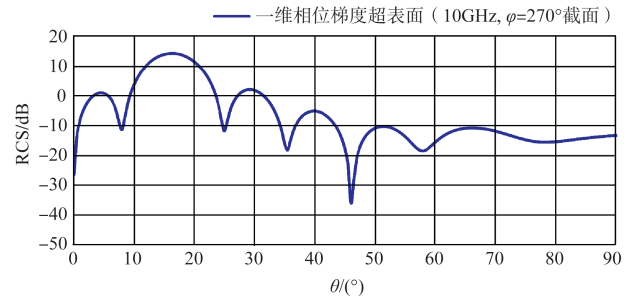


图9 一维相位梯度超表面双站RCS仿真结果

Fig.9 1D phase gradient metasurface bistatic RCS simulation results

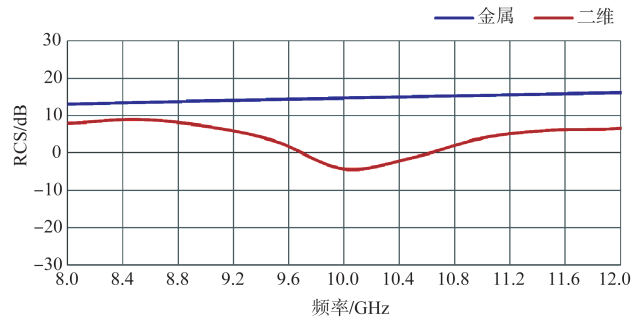


图10 二维相位梯度超表面单站RCS仿真结果

Fig.10 2D phase gradient metasurface monostatic RCS simulation results

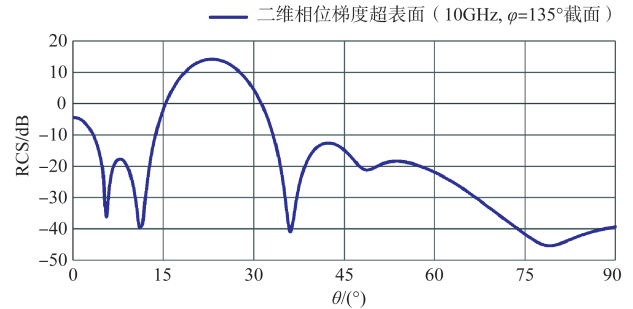


图11 二维相位梯度超表面双站RCS仿真结果

Fig.11 2D phase gradient metasurface bistatic RCS simulation results

此外,需要说明的是,本文仅针对电磁波垂直入射的情况进行了仿真验证,对于入射角偏离法向的情况,可以给定 θ_i/φ_i ,通过式(1)~式(4)计算出波束偏折的方向,另外单元的尺寸(反射相位)选取同样需要考虑入射角,可以通过仿真分析得到。

4 结论

本文提出了一种作用于X波段的圆形贴片开口十字缝

表 2 相位梯度超表面阵列 RCS 仿真结果统计

Table 2 Statistics of RCS simulation results for phase gradient metasurface arrays

类型	RCS 减缩 峰值/dB	RCS 减缩 均值/dB	理论最大 散射方向/ (°)	仿真最大 散射方向/(°)	面内最大 误差/(°)
一维阵列	41.13	8.7	$\theta=16.1$, $\varphi=270$	16.5	0.4
二维阵列	16.29	9.04	$\theta=23.1$, $\varphi=135$	23	0.1

隙式反射型相位梯度超表面,通过调节缝隙尺寸覆盖不同的反射相位,单元具有极化不敏感特性能够适用于多极化状态场景,并基于该系列超表面设计了一维和二维相位梯度阵列,实现了单站 RCS 减缩和双站 RCS 的散射方向调控。对于单站 RCS,一维阵列在 X 波段 RCS 峰值减缩 41.13dB、均值减缩 8.7dB,二维阵列在 X 波段 RCS 峰值减缩 16.29dB、均值减缩 9.04dB,大幅度降低了后向散射数值。对于双站 RCS,一维阵列实现了面内最大散射方向 16.1° 的偏转,二维阵列实现了最大散射方向俯仰 23°、方位 135° 的偏转,调控效果明显,且仿真结果与理论计算误差小于 0.5°。因此,设计的一维和二维相位梯度超表面阵列能够兼顾单站 RCS 缩减的同时实现双站 RCS 散射方向的调控,满足了针对单站雷达和双站雷达隐身的军事应用需求,且设计目标、参数人为可控,具有较好的工程实用价值。 **AST**

参考文献

- [1] Limiti E, Alibakhshi-Kenari M, Virdee B S, et al. Periodic array of complementary artificial magnetic conductor metamaterials-based multiband antennas for broadband wireless transceivers[J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2016, 10(15):1682-1691.
- [2] Gao Xi, Han Xu, Cao Weiping, et al. Ultrawideband and high-efficiency linear polarization converter based on double V-shaped metasurface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(8):3522-3530.
- [3] Yu Nanfang, Genevet P, Kats M A, et al. Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction[J]. Science, 2011, 334(6054):333-337.
- [4] Francesco A, Patrice G, Kats M A, et al. Aberration-free ultra-thin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces[J]. Nano letters, 2012(9):12.
- [5] He Qiong, Sun Shulin, Xiao Shiyi, et al. Metamaterials to bridge propagating waves with surface waves and control electromagnetic waves[C]. 2013 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), 2013.
- [6] 汪竹,王德戎,冉雪红,等. Ku 波段电磁聚焦相位梯度超表面设计[J]. 电子器件, 2021, 44(2):502-506.
Wang Zhu, Wang Deshu, Ran Xuehong, et al. Design of Ku-band electromagnetic focusing phase gradient metasurface[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2021, 44(2): 502-506. (in Chinese)
- [7] 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):153-159.
Li Yongfeng, Zhang Jieqiu, Qu Shaobo, et al. Design and experimental verification of atwodimensional phase gradient metasurface used forradar cross section reduction[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(8):153-159. (in Chinese)
- [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):218-222.
Wu Chenjun, Cheng Yongzhi, Wang Wenying, et al. Design and radar cross section reduction experimental verification of phase gradient meta-surface based on cruciform structure[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(16):218-222. (in Chinese)
- [9] 刘英,李娜,贾永涛,等. 基于相位梯度表面的缝隙阵列天线宽带 RCS 减缩[J]. 电波科学学报, 2018, 33(3): 330-336.
Liu Ying, Li Na, Jia Yongtao, et al. Wideband radar cross section reduction of slot antenna array with phase-gradient metasurface[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2018, 33(3) : 330-336. (in Chinese)
- [10] 雷雪,邹义童,尚玉平,等. 基于超表面的钝二面角结构后向散射增强设计[J]. 电子元件与材料, 2019, 38(8):99-105.
Lei Xue, Zou Yitong, Shang Yuping, et al. Backscattering enhancement of an obtuse dihedral corner structure through metasurface[J]. Electronic Components and Materials, 2019, 38(8):99-105. (in Chinese)
- [11] 张威虎,牛珍珍. 超宽带共极化相位梯度超表面的设计[J]. 现代电子技术, 2022, 45(17):11-16.
Zhang Weihu, Niu Zhenzhen. Design of ultra-wideband co-polarized phase gradient metasurface[J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(17):11-16. (in Chinese)

A Reflective Electromagnetic Metasurface Based on Phase Gradient Principle and RCS Reduction Application

Zhao Yitong, Zhang Wenqi, Zhou Jian, Xiang Qian

Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100029, China

Abstract: For electromagnetic beamforming and electromagnetic stealth issues, a reflective phase gradient metasurface in the form of cross slits on a circular patch is designed, and the differential reflective phase coverage is achieved by adjusting the cell size. Metasurface acts in the X-band and arranges the metasurface units in a linear, equal-phase difference format to deflect the maximum scattering direction of the reflected wave out of the angular field of interest. By adjusting the value of the phase gradient, the maximum scattering direction can be precisely controlled to reduce monostatic backscattering while taking into account the reduction of bistatic scattering in the angle of interest domain. The unit structure is symmetrically designed with polarization-insensitive characteristics. Based on this phase gradient metasurface, the 1D and 2D phase gradient metasurface arrays are designed. The peak RCS of the 1D array structure is reduced by 41.13dB, the mean value is reduced by 8.7dB, and the maximum scattering direction is deflected by 16.5° ; the peak RCS of the 2D array structure is reduced by 16.29dB, the mean value is reduced by 9.04dB, and the maximum scattering direction is $\phi=135^\circ, \theta=23^\circ$. 1D and 2D arrangement forms achieve monostatic and bistatic radar stealth effect.

Key Words: left-hand material; metasurface; phase gradient metasurface; RCS; Snell's law