

文章编号: 2096-1618(2021)06-0587-05

基于共形超表面的波束聚焦研究

周智汕, 杜国宏, 孙筱枫

(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:设计仿真了一款由圆环相切构成的反射型超表面单元,通过改变单元尺寸,10 GHz时其反射系数相位变化可达 430° ,反射系数幅值大于0.9。基于广义斯涅耳定律和相位梯度原理,将 45×45 个单元组成超表面阵列,共形于圆心角为 90° 的部分柱体,可使喇叭天线垂直入射的电磁波实现反射波束在柱面法线方向上的汇聚。仿真结果表明,10 GHz时,共形超表面与金属共形目标体相比,其反射波束的增益提高10 dB以上。通过对共形超表面的研究,可将传统的超表面的应用从平面延伸到曲面上,拓展超表面的实际应用场景。

关键词:超表面;共形;波束聚焦

中图分类号:TN823

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2021.06.001

0 引言

自由调控电磁波的散射特性一直是热门但非常具有难度的研究课题之一。传统的解决方案一般通过光学器件来改变电磁波的动力学相位,从而实现对电磁波的调控。但光学器件本身存在的诸多限制,例如体积大、加工难度和成本较高等,使得其难以得到广泛的应用。而人工电磁超表面的出现,让这一研究课题有了新的突破方向。人工电磁超表面简称超表面,是人工电磁材料的二维结构^[1]。与三维的人工电磁材料相比,二维的人工电磁超表面具有结构简单、剖面低、易于共形以及加工制作简单等优点,十分适合小型化和集成化。可以对电磁波的相位、幅度、极化等特性进行自由调控^[2-3]。

人工电磁超表面的功能是调控电磁波。传统的超表面多是平面结构,主要用于对平面结构的电磁散射的控制。将超表面覆盖在目标体上的虚拟赋形技术^[4]可以改变目标体的电磁散射特性,从而误导雷达的探测和感知。当需要对非平面结构的目标体进行散射调控时,就需要将超表面与目标体进行共形,从而达到调控目标体的散射能量的目的。对共形超表面的研究,可以使超表面不再只适用于平面结构的散射调控,增加超表面的实用能力和应用场景。文中的共形目标选择常见的柱体,利用共形超表面实现柱面结构反射波束的聚焦。

平面超表面常利用相位梯度来实现电磁波散射特性的调控^[5],将具有不同相位的超表面单元结构按照某一特定相位梯度进行排列,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,从而灵活地控制反射波或透射波的传播方向。具体的相位梯度的大小,则可以通过广义斯涅耳定律^[6]计算得出。但将超表面共形后,直接利用相位梯度进行超表面布阵的方法不再适用于曲面结构的分析^[7-8]。

采用几何分区法,当电磁波垂直入射时,将柱面划分为几个不同的区域,每个区域都可以近似地看作是平面结构,只是每个区域的入射波都具有不同的入射角,再根据每个区域对应的入射角分别进行分析^[8]。对于不同的入射角,通过广义斯涅耳定律计算得出使反射波偏转到柱面法线方向所需要的相位梯度,每个区域通过不同的相位梯度补偿,就可以使反射波束均偏转到柱面法线方向上。这样就能够使得整个曲面结构的反射波束聚焦到柱面法线方向上。

1 超表面单元设计

反射型超表面单元通常由金属—介质—金属组成典型的三明治结构,顶层为金属贴片构成的图案层,底层为整面覆铜的金属地板,通过改变图案层的形状大小来获得不同的反射系数相位^[9-10]。设计仿真了一款由圆环相切构成的反射型超表面单元,中介质层采用聚四氟乙烯高频板材 F4B($\epsilon_r=2.65$, $\tan\delta=0.001$, $h=2\text{ mm}$)。顶层金属贴片的基本结构如图1所示,基本参数数值详见表1。

收稿日期:2021-09-10

基金项目:四川省科技厅重点研发资助项目(2020YFG0187,2021YF0355)

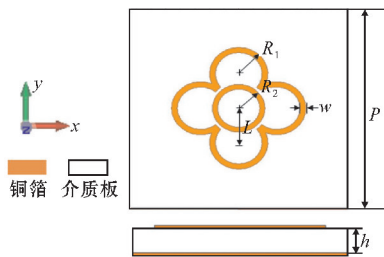


图1 单元基本结构示意图

表1 单元结构参数数值表

参数		取值	
P	15	R_1	1 ~ 3.2
h	2	R_2	0.8 R_1
w	0.2	L	1.3 R_1

该单元的周期 $P=15\text{ mm}$, 等于中心频率对应的半波长。单元的外环结构是由4个半径为 R_1 、线宽为 w 的相切圆环组成, 内环是一个圆心位于中心点的半径为 R_2 、线宽为 w 的小圆环, 与外环结构不相连。外部圆环与内部圆环的圆心间距为 L 。因为 R_2 和 L 的取值都与 R_1 成固定系数关系, 因此只需要改变 R_1 的取值大小, 就可以改变整个顶层金属贴片图案的形状大小, 从而改变顶层的等效阻抗, 进而改变单元的反射系数相位。除此之外, 该单元整体结构呈中心对称, 这样的对称结构使得单元对入射波的极化方式不敏感, 单元的反射系数相位不会受到馈源极化方式的影响。

设 $f=10\text{ GHz}$ 的入射波分别以 X 极化和 Y 极化垂直于超表面单元入射。对 R_1 在 $1\sim3.2\text{ mm}$ 进行参数分析, 得到单元在此区间内反射系数相位和幅度的变化曲线。从图2可以看出, X 极化波和 Y 极化波对应的相位变化曲线完全重合, 且相位变化范围达到了 430° 。证明了该单元具有极化不敏感的特性, 并且相位覆盖范围大于 360° 。由图3可知, 该单元的反射系数幅度在整个变化区间内均大于0.9, 说明绝大部分入射波能量都被反射出去, 可以近似处理为全反射。综合图2和图3的结果, 该单元在工作频率10 GHz时是一款符合要求的反射型超表面单元。

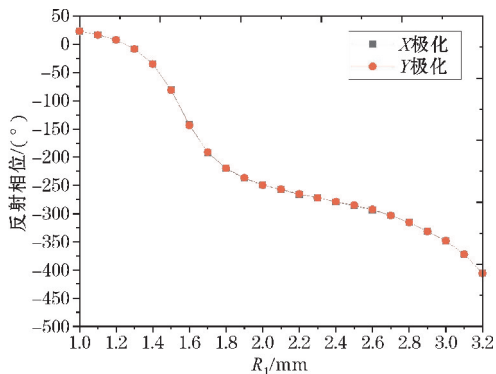


图2 单元反射系数相位变化曲线

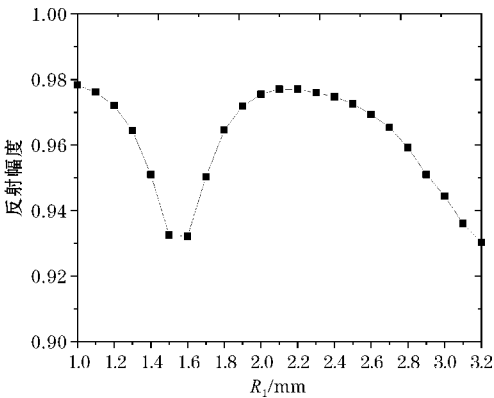


图3 单元反射系数幅度变化曲线

2 超表面共形的理论分析

2.1 广义斯涅尔定律

经典斯涅尔定律又被称为折射定律, 描述了入射光波与经过交界面产生的折射光波之间角度关系:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \tag{1}$$

其中, n_i 和 n_t 分别是两种介质的折射率, θ_i 和 θ_t 分别是入射光和折射光与界面法线的夹角。经典斯涅尔定律的前提是分界面上各点之间的相位具有连续性。但分析超表面的电磁特性时, 由于超表面引入的突变相位, 使分界面上电磁波的相位不再具有连续性。

广义斯涅尔定律由哈佛大学 Capasso 教授提出^[6], 将超表面引入的突变相位按照一定的相位梯度进行排列, 即可控制反射波束的传播方向。假设两路径无限接近光路径, 则它们之间的相位相等。有

$$k_0 n_i \sin \theta_i dx + (\varphi + d\varphi) = k_0 n_t \sin \theta_t dx + \varphi \tag{2}$$

其中, $k_0=2\pi/\lambda_0$, 表示真空中的波矢量, φ 和 $\varphi+d\varphi$ 代表两条路径的波在交界面上的突变相位。将式(2)整理即可得到广义斯涅尔折射定律:

$$n_i \sin \theta_i - n_t \sin \theta_t = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\varphi}{dx} \tag{3}$$

考虑反射时, 由于入射波和反射波均在同一介质中, 则 $n_i=n_t$ 。则广义斯涅耳反射定律为

$$\sin \theta_r - \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi n_i} \frac{d\varphi}{dx} \tag{4}$$

2.2 相位梯度超表面的理论分析

如图4所示, 假设入射波以 θ_i 入射到超表面上, 并且希望反射波沿着 θ_r 反射出去。入射波矢量 k_i 和反射波矢量 k_r 可以表示为

$$k_i = k_0 \cdot \sin \theta_i \tag{5}$$

$$k_r = k_0 \cdot \sin \theta_r \tag{6}$$

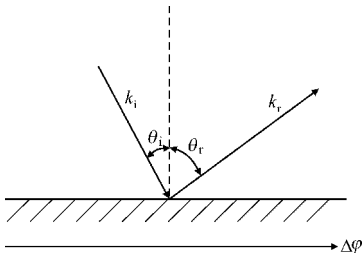


图 4 相位梯度超表面示意图

将反射波束偏折到 θ_r 方向所需要引入的相位梯度与入射波矢量和反射波矢量的关系为

$$k_r = k_i + \frac{\Delta\varphi}{d} \tag{7}$$

其中, $\Delta\varphi$ 表示超表面上相邻两个单元间的相位差,即为相位梯度的大小, d 表示超表面上相邻两个单元的间隔距离,等于单元的周期。将式(7)整理可得相位梯度计算公式:

$$\Delta\varphi = (\sin\theta_r - \sin\theta_i) \cdot \frac{2\pi d}{\lambda_0} \tag{8}$$

这样就建立了超表面通过引入相位梯度来控制反射波方向的映射关系。以设计的单元为例,单元周期 15 mm,假设频率 10 GHz 的入射波以垂直方向入射,希望电磁波沿 θ_r 等于 30° 的方向反射。则有 $\theta_i = 0^\circ$ 、 $\theta_r = 30^\circ$ 、 $d = 15\text{ mm}$ 、 $\lambda_0 = 30\text{ mm}$,将这些条件带入式(8),计算得到 $\Delta\varphi = 90^\circ$ 。因此,沿水平方向以 90° 的相位梯度排列的超表面即可使频率 10 GHz 垂直入射的电磁波反射方向偏折 30°。

2.3 共形超表面的理论分析

文中的共形超表面选择常见的柱面结构,柱面的圆心角 α 设为 90°。共形后的超表面不再满足平面结构,因此直接根据相位梯度进行布阵的方法不再适用。但可以利用几何分区法来对共形超表面进行分析^[8]。另外,柱面是一维弯曲的曲面,因此超表面阵列只在弯曲的方向具有相位梯度,故面阵的布局可以简化为线阵的布局问题。

如图 5 所示,当入射波垂直入射到圆心位于 O 点,圆心角 $\alpha = 90^\circ$ 的圆弧上时,将整个圆弧平均划分为几个小区域。由于每个区域对应的弧度足够小,因此可以将每个区域近似地看作是一个倾斜的平面,每个区域对应一个入射角,大小取该区域中点处的入射角。以 B 点为例,假设 B 点是所在区域的中点,入射角等于法线与垂直方向的夹角,而法线即是直线 OB 。根据几何知识, B 点的入射角就等于圆弧 AB 对应的圆心角,所以 B 点所在区域对应的入射角就等于 $\angle AOB$ 。已知入射角,将反射波偏折到期望角度所需要的相位

梯度根据式(8)可计算得出。需要注意的是,每个区域的人射角不同,对应的相位梯度也不同,要对每个区域分别分析计算。

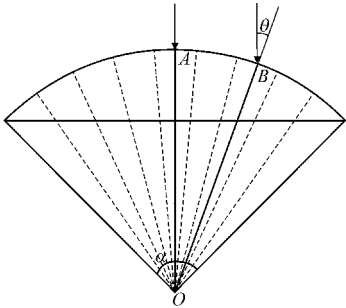


图 5 几何分区示意图

3 共形超表面阵列设计仿真

采用几何分区法设计共形超表面使反射波束聚焦到柱面法线方向上。将整个柱面沿圆弧弯曲方向平均分为 9 个区域,每个区域对应圆心角为 10°。中间区域近似处理为垂直入射,其余 8 个区域呈轴对称分布,分析时只需要计算中线一侧的 4 个区域即可,因此从圆弧中线到边缘区域的入射角 θ_i 分别为 0°、10°、20°、30°、40°,根据式(8),对应的相位梯度分别为 0°、63°、123°、180°、231°。

超表面阵面尺寸大小 675 mm×675 mm,由 45×45 个单元组成,每个区域有 5×45 个单元,并且只在柱面弯曲的方向上呈相位梯度排列。馈源选择标准 X 波段矩形喇叭天线。利用电磁仿真软件计算出馈源喇叭天线在共形超表面上造成的相位差,将馈源相位取反补偿后,再加上每个区域的相位梯度,这样就得到了超表面上每个单元最后需要引入的突变相位,如图 6 所示。在馈源相同的情况下,对共形超表面和形状大小完全相同的金属共形目标体在远场的散射特性分别进行仿真分析。

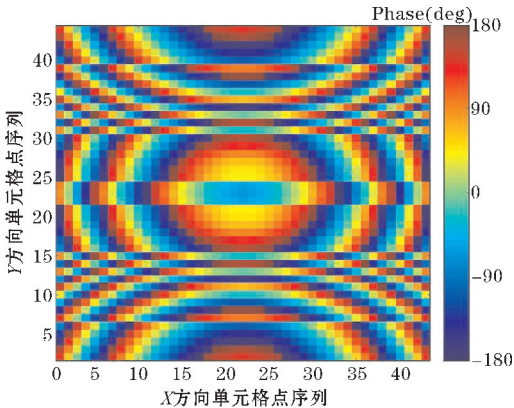


图 6 超表面阵列最终相位分布图

图 7~图 10 表明,共形超表面的反射波束明显地汇聚到柱面法线方向上。 $\Phi = 0^\circ$ 方向上的旁瓣抑制达 14 dB, $\Phi = 90^\circ$ 方向上(圆弧弯曲方向)旁瓣抑制为 7 dB,反射波束的增益提升 10 dB 以上。

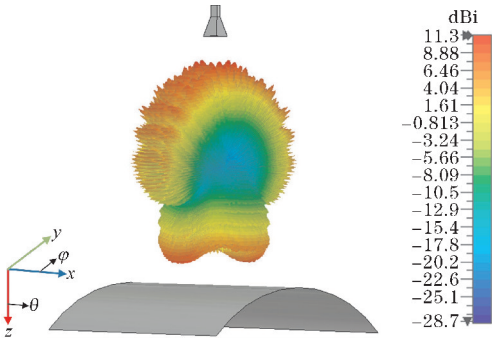


图 7 共形目标体三维远场方向图

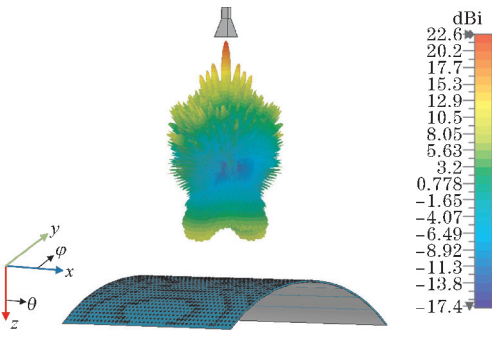


图 8 共形超表面三维远场方向图

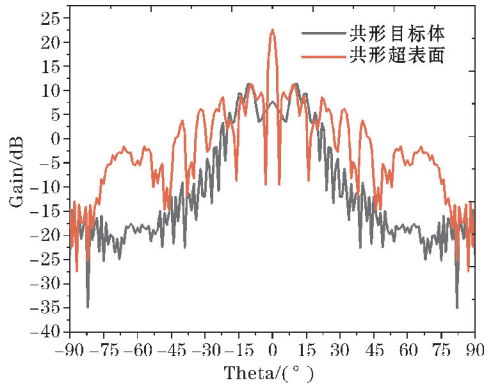


图 9 二维远场方向图对比 ($\Phi = 0^\circ$)

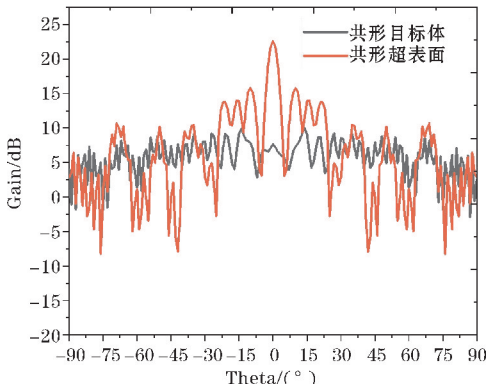


图 10 二维远场方向图对比 ($\Phi = 90^\circ$)

4 结束语

首先设计了一款由圆环相切构成的反射型超表面单元,在工作频率 10 GHz 时单元的反系数相位变化曲线平滑,且相位变化范围达到 430° 。利用该单元组成 45×45 的阵列,再共形到圆心角 $\alpha = 90^\circ$ 的柱面上。采用相位梯度超表面和几何分区法来分析超表面的共形问题,计算得出了使柱面的反射波束聚焦到法线方向上的超表面分布。仿真实验结果表明最终利用共形超表面能够使共形目标体的反射波束汇聚到法向方向上,反射波束的增益提升 10 dB 以上。对共形超表面的研究,使超表面不再只适用于平面结构,拓展了超表面的应用场景和实用能力。

致谢:感谢成都信息工程大学基金项目(KYTZ201816、KYTZ202101)对本文的资助

参考文献:

[1] V G Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of epsilon and miu[J]. Soviet Physics Uspekhi,1968,10(4):509-514.

[2] 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):115214.

[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.

[4] M Pu,Z Zhao,Y Wang,et al. Spatially and spectrally engineered spin-orbit interaction for achromatic virtual shaping[J]. Scientific Reports,2015, 5:9822.

[5] S Sun,Q He,S Xiao,et al. Gradient-index metasurfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. Nature Materials,2012,11(5): 426-431.

[6] N Yu,P Genevet,M A Kats,et al. Light propagation with phase discontinuities:generalized laws of reflection and refraction [J]. Science, 2011, 334(10):333-337.

[7] 庄亚强,王光明,梁建刚,等. 基于柔性各向异性超表面的 RCS 减缩[C]. 2017 年全国天线年会

- 论文集(上册),2017.
- [8] Y J Wang, J X Su. A Prismatic Conformal Metasurface for Radar Cross-Sectional Reduction [J]. IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, 2020, 19(4).
- [9] H F Ma, G Z Wang, G S Kong, et al. Independent controls of differently-polarized reflected waves by anisotropic metasurfaces [J]. Scientific Reports, 2015, 5:9605.
- [10] S Wang, Q Zhan. Reflection type metasurface designed for high efficiency vectorial field generation [J]. Scientific Reports, 2016, 6:29626.

Study of Beam Focusing based on Conformal Metasurface

ZHOU Zhishan, DU Guohong, SUN Xiaofeng

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

Abstract: In this paper, a reflective metasurface unit composed of circles tangent is designed and simulated. By changing the size of the metasurface unit, the phase change of the reflection coefficient can reach 430° , and the amplitude of the reflection coefficient is greater than 0.9 at 10 GHz. Based on the generalized Snell's law and the principle of phase gradient, the metasurface array consisting of 45×45 elements is conformal to a part of the cylinder with a central angle of 90° . The electromagnetic waves incident vertically on the horn antenna can converge the reflected beam in the normal direction of the cylinder. The simulation results show that at 10 GHz, the gain of the reflected beam increases by more than 10 dB with the conformal metasurface. The conformal metasurface proposed indicate that: the traditional metasurface can be extended from plane to curved surface, and the application of metasurface can be expanded.

Keywords: metasurface; conformal; beam focusing