

文章编号: 2096-1618(2021)06-0592-04

基于反射型超表面的近场聚焦研究

王东东, 杜国宏, 孙筱枫, 赵远
(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:首先设计了一种新型反射型超表面单元,在频段 8 ~ 15 GHz 单元反射系数相位范围均超过 360°,在 15 GHz 可达到 700°,能够满足任意方向聚焦对超表面单元相位的需求。由于单元结构的中心对称性,其具有极化不敏感特性。其次,设计了一种由 27×27 个单元所组成,尺寸为 405 mm×405 mm 且工作在 10 GHz 的相位梯度超表面。该超表面采用喇叭空馈电磁波的方式,实现超表面反射波在辐射近场区域产生焦点。最后,通过仿真实验证实了当引入不同极化入射波时,超表面反射聚焦效果保持在稳定水平。该研究在无线输能、近场通信和探测等领域具有潜在应用价值。

关键词:反射型超表面;近场聚焦;极化不敏感

中图分类号:TN822

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2021.06.002

0 引言

电磁超表面技术的兴起为电磁波调控提供了新途径,因此越来越受到国内外学者们的关注^[1]。在电磁波调控的基础上使其产生汇聚作用,无论是在能量传输还是信息通信领域都有着广泛的应用前景,尤其在利用电磁超表面实现辐射式能量传输方面更为有效^[2-3]。超表面具有质量轻、剖面低、结构简单等优点,因此更具实用性和现实意义。李勇峰等^[4]设计了一款中心频率为 16 GHz 的一维反射聚焦超表面,采用右旋圆极化平面波入射,反射波在距超表面垂直距离 200 mm 处聚焦。侯海生等^[5]提出一种具有圆环十字形对称结构的超表面单元,并组阵实现反射波在远场区聚焦。Lu 等^[6]设计了十字交叉偶极子单元并组阵,使用喇叭作为馈源在近场区聚焦,并利用单元极化独立性产生了不同位置的焦点,具有极化敏感性。Ratni 等^[7]通过对单元加装变容二极管,设计出可重构一维超表面,在平面波入射条件下,实现在近场区域聚焦。

文中设计了一款反射型超表面单元,其在 8 ~ 15 GHz 频段内反射系数相位均超过 360°,满足超表面聚焦对相位的需求。由于单元采用中心对称结构,使其具有极化不敏感特性,可适应 X、Y 两种相互垂直的线极化入射波。超表面由 27×27 个单元组成,尺寸为 405 mm×405 mm ($13.5\lambda_0 \times 13.5\lambda_0$, $f_0 = 10$ GHz),采用喇叭空馈,辐射线极化电磁波,垂直照射超表面,实现反射波在辐射近场区域产生焦点。

1 单元结构设计

本文提出的超表面单元采用八边形内嵌圆形的贴片结构。自上而下依次是金属辐射层、介质层、金属底板,如图 1 所示。单元周期为 15 mm ($0.5\lambda_0$),超表面单元作为亚波长结构,相对于波长的比值为 0.5。介质基板选用 Rogers 5880 ($\epsilon_r = 2.65$, $\tan\delta = 0.0009$),介质厚度 $h = 4$ mm;单元金属厚度为 $t = 0.035$ mm 的铜箔,八边形半径 $l = 5$ mm,内圆半径 $r = 0.72l$ mm, $s = 0.08l$ mm。

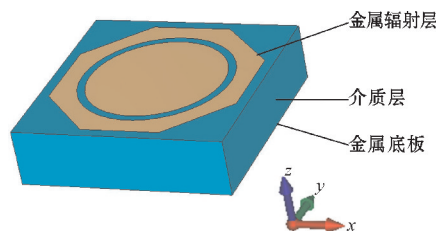


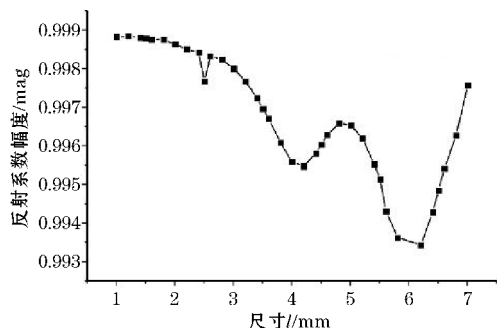
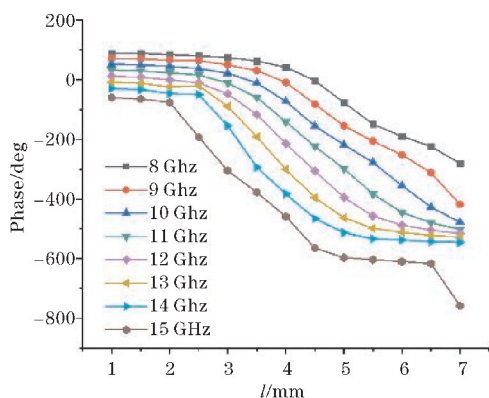
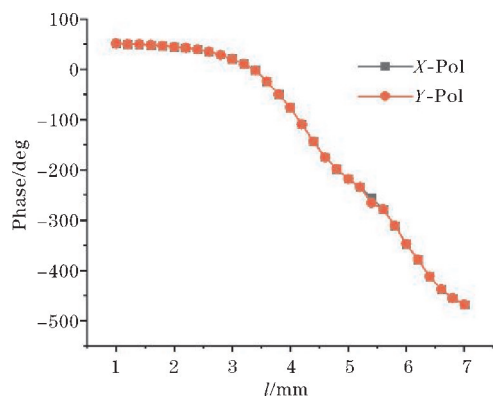
图1 超表面单元结构

图2是超表面单元反射系数幅度,在10 GHz频率不同尺寸下单元反射系数幅度趋近于1。图3为该超表面单元的反射系数相位随单元尺寸 l 的变化曲线。由图3可以看出,在 8 ~ 15 GHz 频段内,随着超表面单元关键尺寸变化,反射系数相位变化范围均大于 360°,符合超表面聚焦的相位需求;并且反射系数相位曲线变化较为平缓,有利于提高超表面相位补偿精度,减小设计误差。

由图4可以看出,当单元工作在10 GHz时,沿 Z 轴方向分别以 X、Y 极化方式照射该单元表面,单元反射系数相位相同,不受极化转换的影响,体现单元极化不敏感特性。

收稿日期:2021-09-15

基金项目:四川省科技厅重点研发资助项目(2020YFG0187,2021YF G0355)

图2 超表面单元反射系数幅度随单元尺寸 l 变化曲线图3 不同频点下的反射系数相位随单元尺寸 l 的变化曲线图4 X、Y极化入射波下反射系数相位随单元尺寸 l 的变化曲线

2 聚焦理论分析与超表面设计

2.1 聚焦理论分析

设计的反射型超表面模型示意图如图5所示,图中feed是馈源位置坐标,focus是焦点位置坐标。反射型超表面的设计,需要根据入射波工作频带、激励方式、焦点位置等指标来确定超表面的相位分布和阵面尺寸。可以通过式(1)计算出波束聚焦所需要的相位分布,从而实现聚焦效果。其中反射超表面上所需要使用的电场分布表达式^[9]为

$$E(x_i, y_i) = A(x_i, y_i) \exp(j\varphi(x_i, y_i)) \quad (1)$$

其中, (x_i, y_i) 为第 i 个单元的中心位置坐标, $A(x_i, y_i)$ 表示第 i 个单元所对应的电场幅度, $\varphi(x_i, y_i)$ 表示第 i

个单元所需要的电场相位。

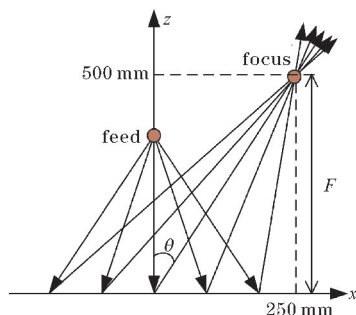


图5 超表面聚焦示意图

所设计的反射型电磁超表面调控电磁波的关键在于:不同尺寸的反射单元能够实现不同大小的反射系数相位。通过设计每个单元的尺寸来调控反射系数相位,改变电磁波传播方向,达到超表面聚焦的目的。根据电磁波传播理论,电磁超表面反射系数相位 $\Delta\varphi = k_0 dx_{ij}$, 其中 k_0 为自由空间波数, dx_{ij} 表示波程差。假定反射超表面上每个单元到目标焦点的距离为 d_{ij} , 到馈源的距离为 c_{ij} , 令反射超表面为参考面, 电磁波的波程差 $dx_{ij} = d_{ij} - c_{ij}$ 。故可以推出反射阵面的补偿相位^[9]为

$$\Delta\varphi(x_i, y_i) = k_0 (|\hat{r}_d - \hat{r}_{ij}| + |\hat{r}_f - \hat{r}_{ij}|) \quad (2)$$

式中, r_d 为焦点坐标, r_{ij} 为各个超表面单元中心坐标, r_f 是馈源坐标。

2.2 超表面设计

根据天线场区理论^[10], 天线辐射半径 $r < 2D^2/\lambda$, 其中 D 为天线最大口径, λ 为天线工作波长, 本文设计目标为在距离超表面500 mm处实现聚焦, 即焦距 $F = 500$ mm。实际应用中, 往往需要波束在近场范围内灵活聚焦, 同时也要避免馈源对反射波的遮挡效应。因此, 设定焦点位置坐标为 $(250, 0, 500)$, 馈源坐标是 $(0, 0, 250)$, 聚焦波束延 X 轴正方向偏转 $\theta = 26.5^\circ$ 。

基于式(1)、(2)取得超表面补偿相位如图6(a)所示。图6(b)为根据图3利用插值算法得到的超表面单元尺寸分布图。该反射超表面工作频率10 GHz ($\lambda_0 = 30$ mm), 超表面由 27×27 个单元组成, 阵面尺寸为 $405 \text{ mm} \times 405 \text{ mm}$ ($13.5\lambda_0 \times 13.5\lambda_0$)。馈源喇叭采用宽带波导喇叭, 工作频率在10 GHz时, 其增益为13 dBi, 采用Y极化方式。

电磁波近场聚焦时, 较高的方向性增益有助于缩小焦斑直径, 减小旁瓣滋生, 进而提高功率流密度, 最终实现波束聚焦效率的提高。由图7可以看出反射波束指向性强, 旁瓣抑制较好, 其增益为19.4 dBi, 半功率波束宽度 HPBW 为 14.9° 。图8为 $\Phi = 0^\circ$ 平面内的远场方向图, 可知波束偏转角度 $\theta = 30.6^\circ$, 与预设值 26.5° 较为吻合。

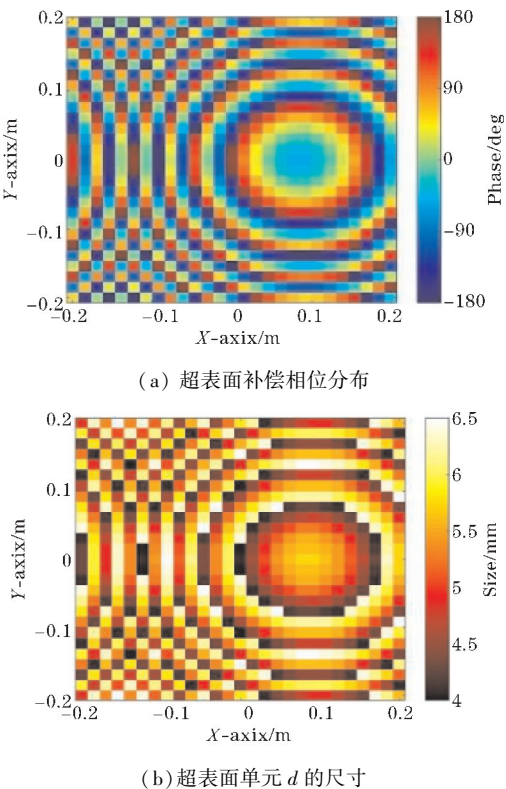


图6 超表面单元相位分布和尺寸分布图

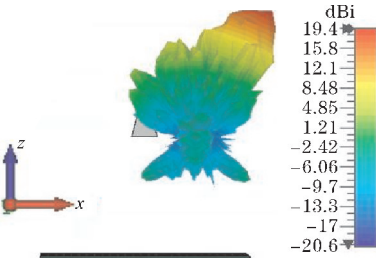


图7 超表面聚焦远场图

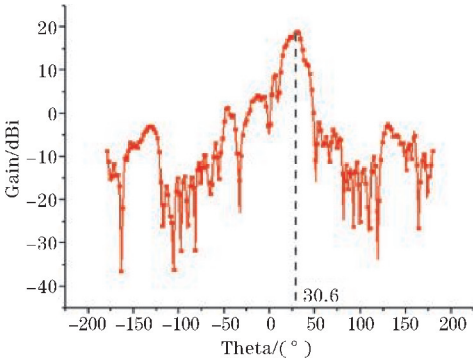


图8 反射波束的远场方向图(Phi=0°)

为了进一步验证所设计反射型超表面的极化不敏感特性,使馈源喇叭沿 Z 轴旋转 90° ,此时入射波变为 X 方向极化。在仿真结果中取 $Z = 500\text{ mm}$ 处,大小为 $400\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ 的 xoy 观测面,在 Y 方向极化和 X 方向极化入射情况下,观测面上电场强度分布特征分别如图9和图10所示。

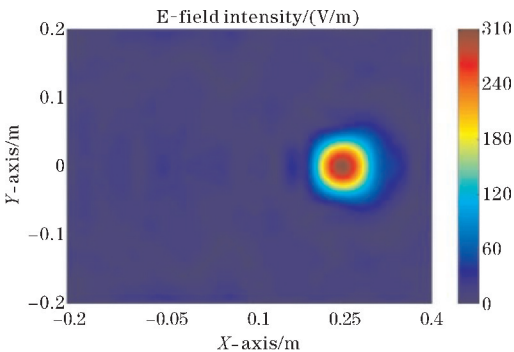


图9 Y 极化入射电场强度分布图

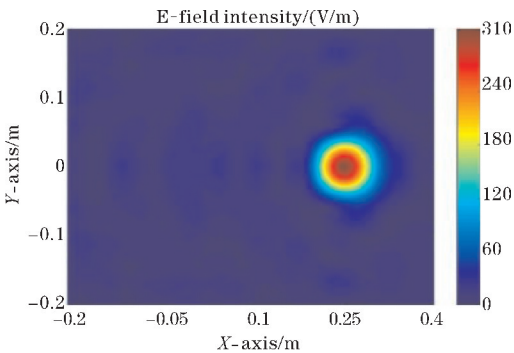


图10 X 极化入射电场强度分布图

通过对比图9和图10可得,预设焦点位置(250, 0, 500)保持不变,其中图9焦点位置处电场强度为301 V/m,图10焦点位置处电场强度为310 V/m,且焦点所在平面电场强度分布特征、焦斑区域电场分布特征均较为吻合,表明该超表面具备极化不敏感特性。

表1 为本文所设计反射型超表面与其他文献研究结果的对比。相较于此前学者对近场区聚焦的研究,焦斑场强相对于文献[9]提高了15%,体现出本文所设计反射型超表面具有较好的聚焦特性。

表1 同类型超表面结构研究数据对比

对比文献	极化方式	馈源形式	焦距/mm	频率/GHz	尺寸/mm	增益/dBi	场强/(V/m)
文献[4]	右旋圆极化	平面波	200	16	$0.2\lambda_0 \times 3.2\lambda_0$	—	5
文献[8]	Y	喇叭	920	10	$9.6\lambda_0 \times 9.6\lambda_0$	18.8	—
文献[9]	Y	喇叭	500	10	$13\lambda_0 \times 13\lambda_0$	—	260
本文	X	喇叭	500	10	$13.5\lambda_0 \times 13.5\lambda_0$	19.5	310
本文	Y	喇叭	500	10	$13.5\lambda_0 \times 13.5\lambda_0$	19.4	301

3 结束语

首先提出了一种新型超表面单元,周期为15 mm,采用单层结构减小了设计难度,在8~15 GHz反射系数相位均大于 360° ,满足设计需求。单元具备极化不敏感特性,能够适用X、Y两种极化的入射波,且不影响超表面聚焦效果,降低了馈源放置难度。

在完成单元设计基础上进行组阵,设计了一款极化不敏感的反射型超表面,其可实现在(250,0,500)处聚焦,电场强度达到300 V/m以上;相比于已有研究,聚焦效果提高了15%,该研究在无线输能、近场通信和探测等领域具有潜在应用价值。

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] Luo Wenluo, Xu Li. Wireless Power Transfer in the Radiative Near-Field Using a Reconfigurable Holographic Metasurface Aperture [C]. IEEE International Conference on Communications (ICC), 2018:1-5.
- [2] Zhang Peng, Li Long, Liu Yongjie. A Dual-Band Reflective Metasurface Using Near-Field Focusing and Zero-Order Bessel Beam for Wireless Power Transfer [C]. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2019:1-3.
- [3] 李龙. 基于电磁超表面的无线能量传输与收集

- 技术研究[A]. 中国电子学会. 2018年全国微波毫米波会议论文集(上册)[C]. 中国电子学会:中国电子学会微波分会, 2018:1.
- [4] 李勇峰, 张介秋, 屈绍波, 等. 圆极化波反射聚焦超表面[J]. 物理学报, 2015(12):151-157.
- [5] 侯海生, 王光明, 李海鹏, 等. 超薄宽带平面聚焦超表面及其在高增益天线中的应用[J]. 物理学报, 2016, 65(2):321-329.
- [6] Lu Yuxiao, Liu Haixia, Li Long. Dual-polarization near-field focused reflective metasurface for WPT in X-band [C]. International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES), Suzhou, 2017:1-2.
- [7] Ratni B, Wang Zhuochao, Zhang Kuang, et al. Reconfigurable Reflective Metasurface for Dynamic Control of Focal Point Position [C]. 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2019:1-3.
- [8] Yu Shixing, Liu Haixia, Li Long. Design of Near-Field Focused Metasurface for High-Efficient Wireless Power Transfer With Multifocus Characteristics [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(5):3993-4002.
- [9] Zhang Pei, Li Long, Zhang Xuanming, et al. Design, Measurement and Analysis of Near-Field Focusing Reflective Metasurface for Dual-Polarization and Multi-Focus Wireless Power Transfer [J]. IEEE Access, 2019, 7:110387-110399.
- [10] John D Kraus, Ronald J Marhefka. 天线[M]. 北京:电子工业出版社, 2015.

Research on Near-field Focusing based on Reflective Metasurface

WANG Dongdong, DU Guohong, SUN Xiaofeng, ZHAO Yuan

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

Abstract: In this paper, a new type of reflective metasurface unit is designed. The range of the reflection coefficient phase of the unit is over 360° in the frequency band of 8-15 GHz and can reach 700° at 15 GHz. The proposed design can meet the requirements of the metasurface unit phase to achieve focusing in any direction. Due to the central symmetry of the unit structure, it has the characteristics of polarization insensitivity. Then, a phase gradient metasurface with a size of 405 mm×405 mm is comprised of 27×27 units and it can work at 10 GHz. Using the air-fed method, the electromagnetic wave reflected by the designed metasurface can form a focal point in the near-field area. At last, simulation experiments prove that when incident waves with different polarizations are considered, the focusing effect of reflective metasurface remains at a stable level. This research has potential application value in the fields of wireless energy transmission, near-field communication and detection.

Keywords: reflective metasurface; near-field focusing; polarization-insensitive