

基于表面-电路-表面型超表面的 大旋转角度异常反射和异常折射

司马博羽, 侯芸芳, 冯梦龙, 李坤泽, 徐翊邦, 康 炜, 钱嵩松, 宗志园

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京, 210094)

摘要 提出了一种基于表面-电路-表面型超表面(SCSMS)来实现高效率的异常反射和折射的方法。与传统的相位梯度超构表面(PGM)不同,提出的SCSMS首先通过表面天线将入射空间电磁波转换为导行波,然后通过调整背接电路的长度来实现相位梯度分布。最后,通过表面天线将波传回自由空间,从而实现想要的波前控制。通过这种方法,可以消除不必要的单元间耦合效应。为了说明所提出的波前调控方法的原理,设计了2个SCSMS分别进行 20° 入射 50° 反射的大旋转角异常反射和 0° 入射 50° 出射的大旋转角异常折射。仿真结果表明:该方案可以实现高效的异常反射和折射,效率分别为68%和79%。这为利用SCSMS实现具有大旋转角度的高效异常反射和折射或其他类型的波前操作提供了有效的案例。

关键词 超表面;异常反射;异常折射;表面-电路-表面

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.03.003

中图分类号 TN82 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)03-0017-09

An Anomalous Reflection and Anomalous Refraction with Large Rotation Angle Based on Surface-Circuit-Surface Metasurface

SIMA Boyu, HOU Yunfang, FENG Menglong, LI Kunze, XU YiBang, KANG Wei,

QIAN Songsong, ZONG Zhiyuan

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University
of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract A novel method for efficient anomalous reflection and refraction based on Surface-Circuit-Surface Metasurface (SCSMS) is proposed in this paper. Being different from traditional Phase Gradient Meta-surface (PGM), first, the proposed SCSMS is to convert incident spatial waves to guided waves by surface antennas, and then gradient phase distribution is to realize by adjusting the length of the back-loaded circuit. Finally, the wave is to be transmitted to the free space by the surface antenna, achieving the desired wave front control. By this way, unwanted coupling effects between units can be eliminated. To illustrate the principle of the proposed wave front regulation method, two SCSMS are designed for anomalous reflection (20° - 50°) and refraction (0° - 50°) respectively. The simulation results show that high efficient anomalous reflection and refraction can be achieved with efficiency of 68% and 79% respectively. And this program provides an effective case for efficient anomalous reflection and refraction with large rotation angles

收稿日期: 2022-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(61871225,62101262)

作者简介: 司马博羽(1987-),男,江苏无锡人,讲师,博士,研究方向为电磁场与微波技术。E-mail: smby@njust.edu.cn

引用格式: 司马博羽,侯芸芳,冯梦龙,等.基于表面-电路-表面型超表面的大旋转角度异常反射和异常折射[J].空军工程大学学报,2023,24(3):17-25. SIMA Boyu, HOU Yunfang, FENG Menglong, et al. An Anomalous Reflection and Anomalous Refraction with Large Rotation Angle Based on Surface-Circuit-Surface Metasurface[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(3): 17-25.

or other types of wave front operations using SCSMS.

Key words metasurface; anomalous reflection; anomalous refraction; surface-circuit-surface

超表面(metasurface, MS),是一种由亚波长尺寸周期晶格排列的人工结构单元组成的平面阵列结构,其已经被广泛证明在控制入射波束的传播特性方面具有强大的能力^[1-6]。它可以实现多种自由度的电磁波操纵功能,包括对振幅、相位和偏振等自由度的调控,加上其低剖面、重量轻、成本低等特点,受到学界持续关注,应用前景广阔。目前,基于超表面已经产生了许多典型应用和功能,如聚焦^[7-9]、异常反射(折射)^[10-12]、RCS 缩减^[13-15]等^[16-26]。在不同类型的超表面中,由于相位梯度超表面(phase gradient metasurface, PGM)在控制电磁波的传播方向、修改波前、产生异常反射(折射)等现象方面具有显著特性。在过去的十多年中得到了广泛的研究,是超表面中一类重要的基础性、代表性工作^[27-29]。

然而,研究发现,由于局部非周期性引起的相邻单元间的非必要电磁耦合,会对超表面最终的电磁波调控效果产生额外的影响,特别是在需要大相位梯度变化时^[30-32],会降低传统 PGM 对波束调控的效率。目前,利用一定的优化方法^[33-34]可以解决这一问题,但它们通常依赖于大量的模拟计算和优化过程,这耗费了巨大的计算机资源。

本文中提出了一种基于表面-电路-表面型超表面(surface-circuit-surface metasurface, SCSMS)的设计架构来实现具有大偏转角的高效异常反射和异常折射的方法。与传统的通过结构设计等效表面阻抗直接与空间电磁波相互作用的超表面不同,SCSMS 首先使用上表面天线接收入射波,然后将其耦合传输到背接于天线地板的射频(RF)电路中。为了实现相位梯度分布,将各个单元的背接射频电路设计为具有不同的长度,而表面天线的结构保持相同,从而实现对单元相位的控制,形成所需的相位梯度变化。通过这种结构,将传统超表面直接对空间电磁波调控的方式转变为先对空间电磁波进行接收并转换为导行波再通过射频电路对导行波进行调控的方式。该方式对电磁波特性的调控主要在射频电路中完成,由于导行波能量传输的局域性,从而可以消除由非周期性引起的相邻单元间不必要的电磁耦合。基于该原理我们设计了 2 种 SCSMS 结构分别用来实现异常折射和异常反射。全波仿真结果表明,所设计的 SCSMS 分别可以实现 20°入射 50°反射大旋转角的高效率异常反射和 0°入射 50°折射的高效率异常折射。由于其结构简单,所提出的 SCSMS 可以方便地应用于其他频率范围,如太赫兹和

光学区域。

1 异常反射

1.1 异常反射设计原理

图 1 为提出的反射式 SCSMS 实现异常反射的原理效果图。

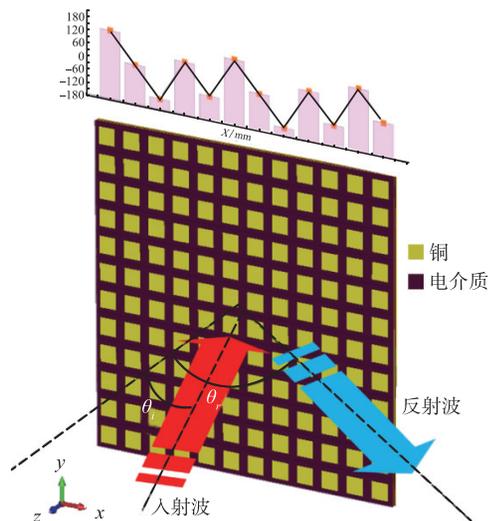


图 1 反射式 SCSMS 异常反射原理

假设 y 极化平面波斜入射所提出的 SCSMS 整体结构,SCSMS 的单元具有相等的散射振幅和范围覆盖 2π 的相位延迟。根据 Snell 定律^[1],入射角与反射角的关系可以表示为:

$$\sin(\theta_r) n_i - \sin(\theta_i) n_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\varphi}{dx} \quad (1)$$

式中: θ_i 为入射角; θ_r 为反射角; n_i 为入射和反射电磁波所在媒质的折射率; $\frac{d\varphi}{dx}$ 为沿 SCSMS 的 x 轴方向的相位不连续梯度。在自由空间中为了实现所需的特定角度的异常反射,这种关系可表示为:

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

可以看出,实现异常反射的关键是实现沿界面的特定相位变化。假设入射角 $\theta_i = 20^\circ$,异常反射角度 $\theta_r = 50^\circ$,则根据式(2),所需设计的相位梯度 $\frac{d\varphi}{dx}$ 应为 146.26° 。传统的 MS 在单元结构设计中利用具有相似图案但尺寸不同的金属结构来实现可变的共振,从而产生变化的反射相位分布。反射式 SCSMS 的机理不同,反射式 SCSMS 的每个单元由两部分组成:表面天线部分和背接射频电路部分。天线部分用于接收入射的电磁波,并将电磁能量反射

回自由空间。而背接电路部分负责调控由天线部分接收到的电磁波的相位延迟。基于该种反射式 SC-SMS 机理,为了实现所需要的相位梯度分布,关键点在于设计高效率的表面天线以及具有不同相位延迟的射频电路。

1.2 单元结构设计

在反射式 SCSMS 设计中,每个超表面单元结构由一个表面天线部分和一个背接射频电路部分组成,结构如图 2 所示。根据高效率 and 小型化的设计要求,选择了方形贴片和闵可夫斯基分形贴片堆叠的形式来实现表面天线。堆叠设计有助于提高工作带宽和阻抗匹配。方形贴片和闵可夫斯基分形贴片结构均位于 Rogers RO3003 介质基板上,介电常数为 3,介电损耗切线为 0.001,厚度 $h_1 = 0.254 \text{ mm}$ 。实现反射相位控制的核心设计是背接射频电路层。背接射频电路采用带状线结构,上下金属基线和中间的相延线被基板分隔,也是 Rogers RO3003。图 2(e)所示的基底同时作为闵可夫斯基分形贴片的天线地板,和带状线射频电路结构的上地板。天线地板中上部的 H 形槽用于实现贴片天线与背接射频电路之间的高效孔径耦合。最底层为全金属结构,作为带状线射频电路结构的上地板,若不考虑吸收损失,可以保证入射波被完全反射。不同介质基板间的粘合层采用 Rogers 4450B,其介电常数为 3.52,介电损耗切线为 0.003,高度位 $h_2 = 0.1 \text{ mm}$,用于结合 RO3003 基底,使介电参数的一致性最大化,从而简化设计过程。各金属层、介质基底层和粘合层的排布堆叠情况如图 2(b)所示。

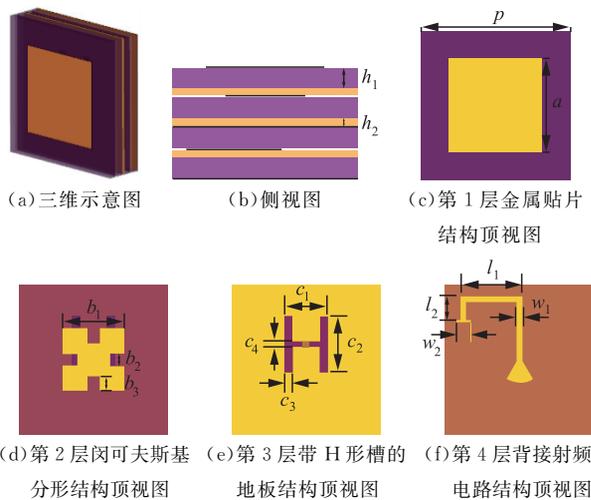


图 2 反射式 SCSMS 单元结构

使用商用全波仿真软件 CST,在 16~28 GHz 的频率范围内,对图 2 中所示的单元结构进行了数值模拟和优化。仿真过程有 2 个步骤:第 1 步是对周期边界条件下的单元结构的天线效率进行仿真和优化。仿真了射频电路终端端接匹配端口时,电磁

波从自由空间耦合至终端端口的传输效率,电磁波传输模拟设置见图 3(a),优化后的仿真结果见图 3(b)。可以看出,从 19.86~24.92 GHz 的耦合传输效率高于一 0.5 dB,这意味着在这个频率范围内,优化后的单元结构可以以近乎完美的效率将自由空间入射波耦合至背接电路当中。第 2 步仿真电路终端开路情况下的单元结构反射特性,研究了不同长度的背接射频电路情况的反射系数和相位分布。从图 4 可以看出,在 21.5 GHz 左右,当 L 从 0.5 mm 变化到 4.5 mm(其中 $L = l_1 + l_2$)的过程中,反射系数大于一 0.7 dB,相位变化覆盖 360° 。该仿真结果表明,所设计的反射式 SCSMS 单元能够满足所需的异常反射的要求。优化后的结构尺寸参数见图 2(b)~(f),其中 $h_1 = 0.254 \text{ mm}$, $h_2 = 0.1 \text{ mm}$, $p = 5 \text{ mm}$, $a = 3.2 \text{ mm}$, $b_1 = 2.1 \text{ mm}$, $b_2 = 0.4 \text{ mm}$, $b_3 = 0.5 \text{ mm}$, $c_1 = 1.5 \text{ mm}$, $c_2 = 1.9 \text{ mm}$, $c_3 = 0.3 \text{ mm}$, $c_4 = 0.2 \text{ mm}$, $w_1 = 0.2 \text{ mm}$, $w_2 = 0.5 \text{ mm}$ 。

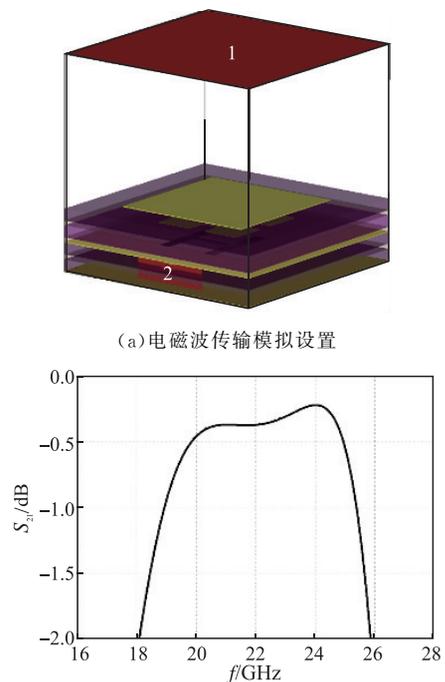
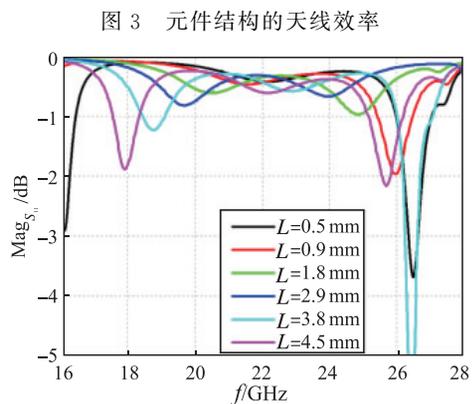
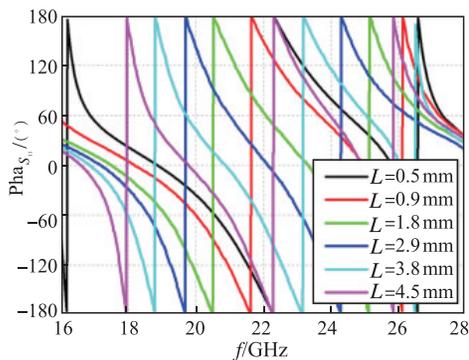


图 3 元件结构的效率



(a) 模拟的反射系数变化曲线

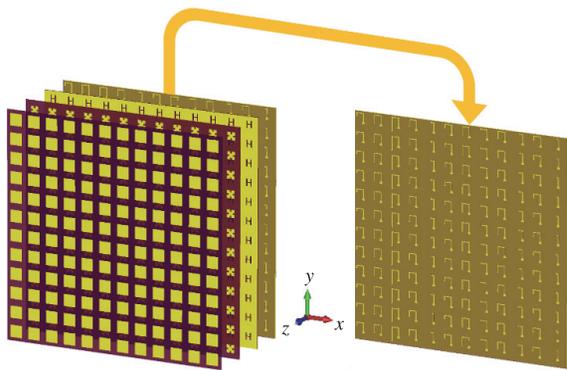


(b) 反射系数的模拟相位变化曲线

图 4 不同背载电路长度的反射 SCSMS 元件的模拟结果

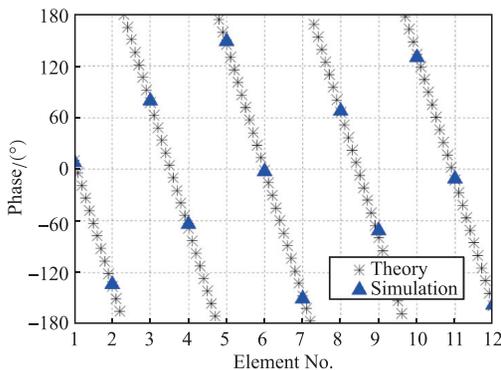
1.3 异常反射 SCSMS 整体结构设计

在本节中,设计了一个由 12×12 单元组成的反射式 SCSMS,用于在 y 极化 20° 斜入射情况下实现异常反射。根据第 1.1 节的推导,为了实现反射角度 θ_r 为 50° 的异常反射,相邻元件之间的相位差应为 146.26° 。因此,设计优化了 12 个基础单元(单元射频电路尺寸 L 分别为 0.5 mm, 0.9 mm, 1.1 mm, 1.8 mm, 2.9 mm, 3.1 mm, 3.2 mm, 3.8 mm, 4 mm, 4.4 mm, 4.5 mm, 5.8 mm)并组成阵列,如图 5 所示。理论要求的与仿真得到的沿 x 轴方向的反射相位分布如图 6 所示。可以看出,文中设计的基础单元的相位分布与理论上的要求吻合较好,只有少数单元存在微小的差异,可以忽略不计。



(a) 分层 SCSMS 三维结构 (b) 背接射频电路层的三维示意图

图 5 异常反射 SCSMS 整体结构设计

图 6 沿 x 轴方向反射相位分布

为了证明所设计的反射式 SCSMS 在 y 极化 20° 入射时的高效异常反射效果,我们对 SCSMS 和

相同尺寸的金属板进行了全波仿真。激励条件设置为 y 极化平面波从 20° 方向入射,在 21.5 GHz 处的远场 RCS 仿真结果如图 7 所示。

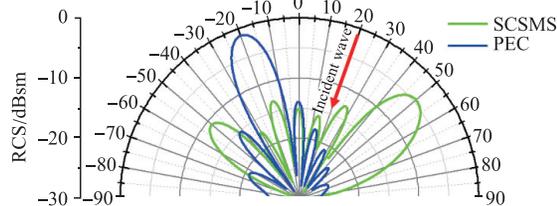


图 7 RCS 仿真结果

从图 7 中不难看出,在 y 极化斜 20° 入射条件下,所提出的反射式 SCSMS 可以实现高效的异常反射。其 RCS 值在 50° 时达到最大为 -4.5 dBsm。而对于金属板由于镜面反射,RCS 在 -20° 时达到最大为 -1.2 dBsm。异常反射效率接近 68%,这对 70° 的大旋转角度而言效率是比较高的。如文献 [35] 中所讨论的,这一效率值接近常规相位梯度超表面方法在实现 70° 大旋转角度异常反射时的理论效率值上限。需要注意的是,这里所述的理论效率值上限是针对传统相位梯度型单元排布方式超表面而言的。有科研人员提出了一些特殊的方法来突破这一极限值^[36-38],例如二元光栅方案、非局域漏波表面方案等,但是在本文中为了简单明了暂时不考虑这些特殊的方法,只限于采用传统的相位梯度方案来设计整个超表面的排布。

2 异常折射

2.1 异常折射设计原理

同样,设计了透射型的异常折射 SCSMS,见图 8。首先,对异常折射所需的理论相位梯度要求进行推导。根据广义 Snell 折射定理^[39]:

$$\sin(\theta_r) n_r - \sin(\theta_i) n_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\varphi}{dx} \quad (3)$$

式中: θ_i 为入射角; θ_r 为折射角; n_i 为入射介质的折射率; n_r 为折射介质的折射率,其中 $\frac{d\varphi}{dx}$ 是入射电磁波沿超表面在 x 轴方向上的相位梯度,由于电磁波在空气中入射,故这种关系可以表示为:

$$\sin(\theta_r) - \sin(\theta_i) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\varphi}{dx} \quad (4)$$

可以看出,异常折射的角度由超表面产生的相位梯度决定,假设入射角为 0° ,异常折射角度为 50° ,则根据该广义 Snell 定律算出透射式的透射相位梯度为 $-6.76^\circ/\text{mm}$,可以满足使折射角度 50° 的

要求。

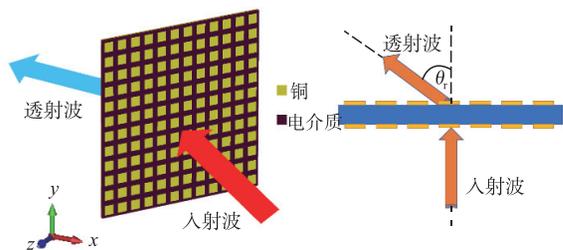


图 8 异常折射 SCSMS 概念示意图

2.2 单元结构设计

在设计异常折射 SCSMS 中,每个超表面单元由一个上表面天线部分,一个背接射频电路部分和下表面天线部分组成,如图 9 所示。

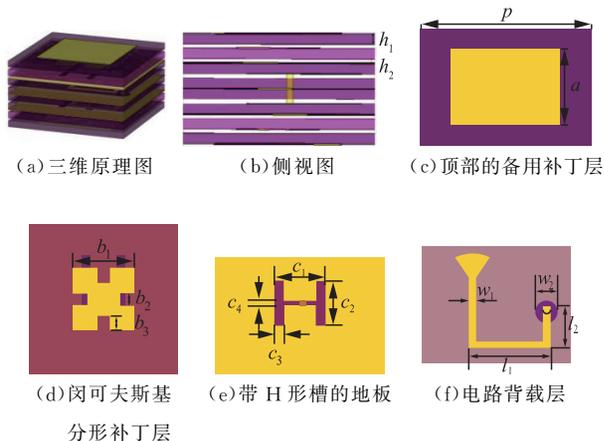


图 9 SCSMS 装置的结构示意图

根据高效率电磁接收辐射的设计要求,选择了一个方形贴片和一个闵可夫斯基分形贴片来实现接收天线和发射天线。堆叠设计可以提高工作带宽和阻抗匹配。方形贴片和闵可夫斯基分形贴片均位于 Rogers RO3003 基板介质上,其介电常数为 3,介电损耗正切角为 0.001。实现折射相位控制的核心设计是背接射频电路层。背接电路层采用带状线结构,基板介质同样采用 Rogers RO3003。图 9(e)为基底同时作为闵可夫斯基分形贴片的地板和带状线结构的上表面地板。天线地板中上部的 H 形槽用于实现贴片天线与射频电路之间的高效孔径耦合。基板间的粘合层采用 Rogers 4450B,其介电常数为 3.52,介电损耗正切角为 0.003,高度 $h_2=0.1$ mm,配合 Rogers RO3003 基板使用,使介电参数的一致性最大化,简化设计过程。整个透射型 SCSMS 单元结构从上到下依次为:金属方形贴片、介质基板、粘合层、闵可夫斯基分形贴片、介质基板、粘合层、带 H 型缝隙的金属背板、介质基板、粘合层、对称的射频电路结构(中间由金属化通孔相连)、粘合层、介质基板、带 H 型缝隙的金属背板、粘合层、介质基板、

闵可夫斯基分形贴片、粘合层、介质基板、金属方形贴片。入射电磁波由单元结构上表面入射,经过上表面天线结构耦合至背接射频电路部分,再经射频电路部分对相位延迟进行调控后耦合至下表面天线结构部分,最后由下表面天线结构向自由空间辐射。使用软件 CST,在 16~28 GHz 的频率范围内,对图 9 中所示的单元结构进行了数值模拟和优化。仿真过程分为 2 个步骤:第 1 步对周期边界条件下的单元结构的效率进行了仿真和优化。仿真时,射频电路终端接匹配端口,传输系数就表示电磁波由自由空间耦合至射频电路的效率。优化的传输系数结果如图 10 所示。可以看出,从 19.86~24.92 GHz 的传输效率高于一 0.5 dB,这意味着在这个频率范围内,优化后的单元结构可以将空间入射波高效率地耦合至背接射频电路中。第 2 步,仿真了单元结构的透射特性,研究了不同长度的背接电路的透射系数和相位分布。从图 11 可以看出,在 21 GHz 附近,当 L 从 2.1 mm 变化到 5.9 mm(其中 $L=l_1+l_2$)时,透射系数的幅度保持大于一 0.7 dB,相位变化范围覆盖 360° 。从仿真结果可以看出所设计的透射型 SCSMS 基本单元结构能够满足异常折射所需的透射率和相位变化范围要求。优化后的结构几何参数为: $h_1=0.254$ mm, $h_2=0.254$ mm, $p=5$ mm, $a=3.2$ mm, $b_1=2.1$ mm, $b_2=0.4$ mm, $b_3=0.5$ mm, $c_1=1.5$ mm, $c_2=1.9$ mm, $c_3=0.3$ mm, $c_4=0.2$ mm, $w_1=0.2$ mm, $w_2=0.6$ mm。

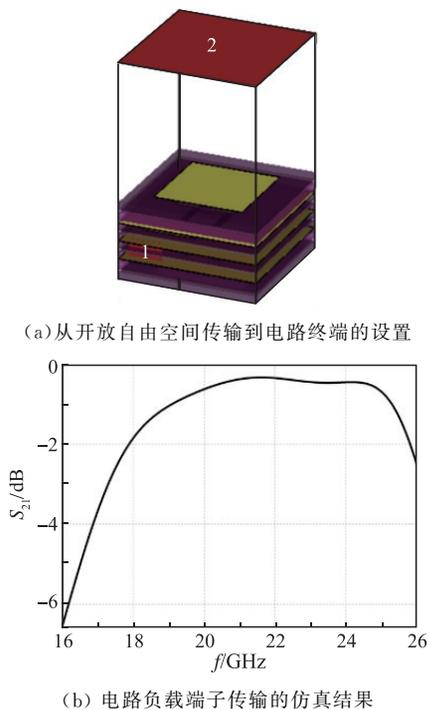
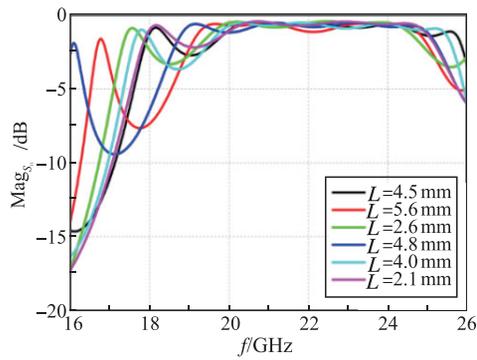
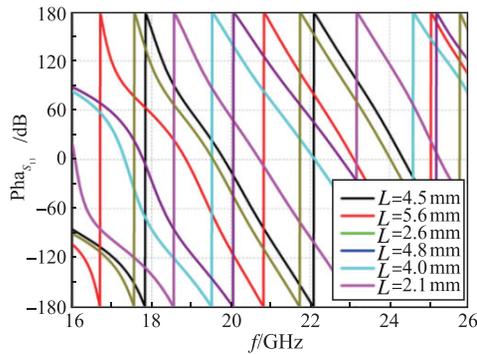


图 10 单元结构的效率仿真分析



(a) 模拟的折射系数变化曲线

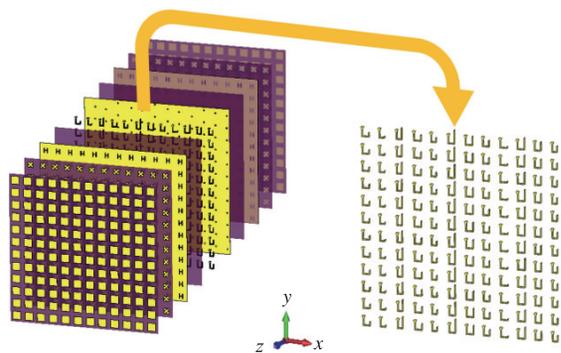


(b) 折射系数的模拟相位变化曲线

图 11 不同背载电路长度的折射 SCSMS 元件的模拟结果

2.3 异常折射 SCSMS 整体结构设计

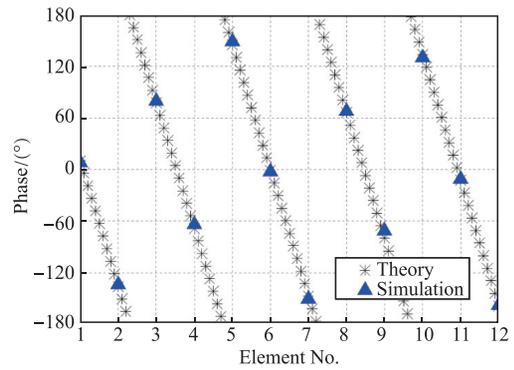
在本节中,设计了一个 12×12 单元的异常折射 SCSMS,见图 12。该 SCSMS 可以在 21 GHz 附近,将 y 极化斜 0° 入射的平面波异常折射至 50° 方向。根据第 2.1 节,为了实现所设计的异常折射,并考虑单元周期间隔,相邻元件之间的相位差应为 146.26° 。据此,仿真设计了 12 个代表性基础单元(包括 $L = 3.4$ mm, $L = 4.5$ mm, $L = 5.6$ mm, $L = 2.7$ mm, $L = 3.7$ mm, $L = 4.8$ mm, $L = 5.9$ mm, $L = 2.9$ mm, $L = 4.0$ mm, $L = 4.0$ mm, $L = 2.1$ mm, $L = 3.3$ mm),并将它们进行一维阵列排布,排布方式见图 12(b)。



(a) 三维视图的整个折射 SCSMS 结构 (b) 电路背载层的三维视图

图 12 折射 SCSMS 设计异常折射

理论的与仿真得到的沿 x 轴方向的相位分布对比见图 13。可以看出,所设计的单元在 21 GHz 处的相位分布与理论上的要求吻合较好。

图 13 沿 x 轴折射相位分布图

为了证明所提出的 SCSMS 可以对 y 极化 0° 入射的平面波进行高效率的异常折射,对 SCSMS 和相同尺寸的自由空间的透射情况进行了全波仿真并进行了对比。为了模拟平面波入射的情况,使用波端口激励一个足够大的金属板并在金属板中间开槽,槽的大小正好与 SCSMS 相当,将 SCSMS 嵌在这个金属板中间。用平面波照射,模拟平面波垂直入射 SCSMS 的情况。如图 14(a)~(d)所示,通过全波仿真,分别得到在 21 GHz 处的放置 SCSMS 时以及空置情况下的电场分布图和能流密度分布图。

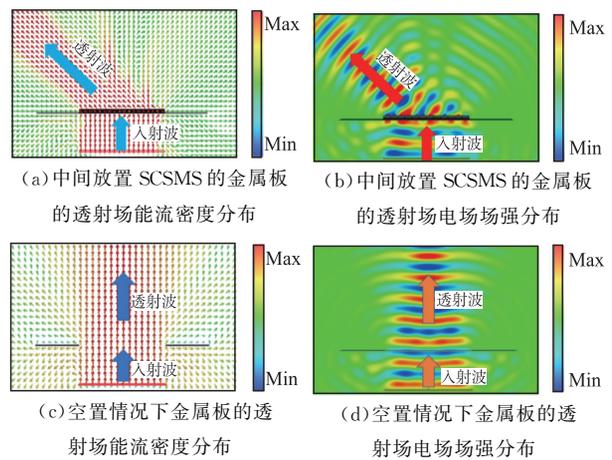
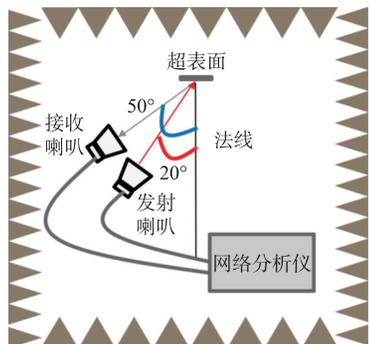


图 14 透射场分布对比图

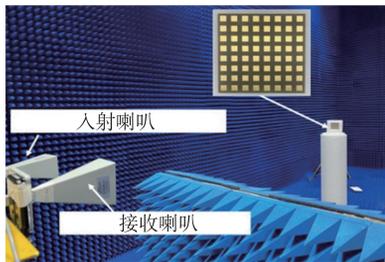
可以看出,在 y 极化垂直入射情况下,所提出的折射 SCSMS 可以在 21 GHz 处实现高效的异常折射,折射角达到 50° 。为了计算异常折射效率,对于放置 SCSMS 的情况,在距离 SCSMS 结构中心 80 mm 处,构造一个与 SCSMS 中心法线方向垂直的足够大平面 (100 mm \times 100 mm),并将该平面围绕 SCSMS 结构中心逆时针旋转 50° 。对该平面内的沿 50° 方向传播的电磁能流密度进行积分得到电磁波能流功率为 1.322 VA。空置的情况下,同样距离镂空中心 80 mm,与中心法线垂直构造相同大小的平面,对该平面范围内沿法线方向传播的能流密度进行积分得到能流功率为 1.686 VA。相比后得到所设计的 SCSMS 异常折射效率接近 79%。对于 50° 的大旋转角度这一效率值也基本接近理论极限值。

3 实验测试

根据前述设计的基于表面-电路-表面型超表面的大旋转角度异常反射 SCSMS 仿真模型,我们加工了对应的实物样品并进行了实验测试。实物测试系统和实验样品如图 15 所示。将加工样品至于微波暗室中,在距离样品 5 m 处(保证远场条件)放置发射喇叭和接收喇叭。发射喇叭和接收喇叭分别连接矢量网络分析仪的端口 1 和端口 2。发射喇叭和接收喇叭都对准样品,极化方向均为垂直极化。发射喇叭位于和样品法线夹角 20° 方向的延迟线上,接收喇叭位于和样品法线夹角 50° 方向的延迟线上。测量流程包括 3 个部分:首先测量样品的 S_{21} 结果;然后将样品换成同样尺寸大小的金属板,并将接收喇叭放置于和样品法线夹角 -20° 方向的延迟线上,测量此时的 S_{21} 结果;最后用金属板的测量结果对样品的结果进行归一化得到归一化的 20° 入射条件下的样品在 50° 方向上的单站 RCS 值。



(a)测试系统原理图



(b)测试系统实物图以及加工样品放大图

图 15 测试系统和测试样品图

图 16 为测试并归一化处理后得到的样品 RCS 随频率变化曲线结果和仿真结果的对比。可以看出测试结果和仿真基本相同,在 21.5 GHz,归一化 RCS 高于 -2 dB,说明该 SCSMS 结构可以将大部分能量反射至所需的方向,实现高效率的异常反射。测试结果和仿真结果的细微差别可能是由于加工和测量误差导致,从整体效果看误差在可以接受的范围内。

综上所述,测试和仿真结果均证明了该基于表

面-电路-表面架构的超表面设计可以实现高效率的大角度异常反射。

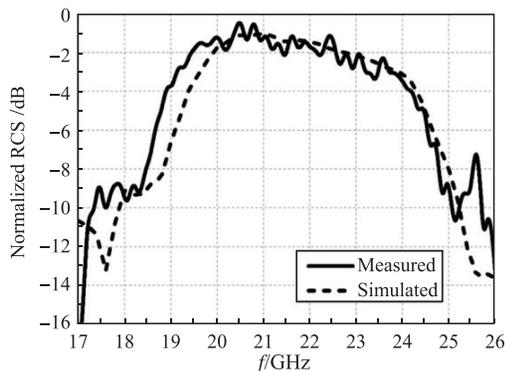


图 16 单站 RCS 测试和仿真结果对比

4 结语

由于传统的相位梯度超表面相邻单元结构图案尺寸不完全一致,当差异较大时,会存在不必要的单元间耦合效应,导致异常反射和折射效率降低。本文针对这一问题,提出了一种基于来实现高效率异常反射和折射的方法。与传统的 PGM 不同,SCSMS 首先通过表面天线将入射空间电磁波转换为导行波,然后通过调整背接电路的长度来实现相位梯度分布。最后,通过表面天线将波传回自由空间,从而实现想要的波前控制。通过这种方法,可以消除不必要的单元间耦合效应。为了验证这一思想,本文设计了 2 种 SCSMS 分别来实现异常反射和折射。对所设计的 SCSMS 进行了全波仿真,仿真结果表明,所设计的反射式 SCSMS 在 21.5 GHz 处可以实现偏转角为 70° 的高效大角度异常反射,异常反射效率达到 68%;所设计的透射式 SCSMS 可以在 21 GHz 处实现偏转角为 50° 的高效异常折射,异常折射效率接近 79%。根据所设计的异常反射 SCSMS 加工了实物样品并进行了实验测试。实验结果与仿真结果吻合。验证了采用表面-电路-表面型超表面在消除单元间不必要的耦合实现大角度高效率异常反射和折射方面的优势,也为 SCSMS 结构在其他电磁波调控方向上应用提供了有利参考。

参考文献

- [1] YU N, 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.
- [2] YU N F, CAPASSO F. Flat Optics: Controlling Wavefronts with Optical Antenna Metasurfaces [C]// 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). Piscataway: IEEE

- Press, 2014; 2341-2342.
- [3] CHEN H T, TAYLOR A J, YU N F. A Review of Metasurfaces; Physics and Applications[J]. Reports on Progress in Physics, 2016, 79(7): 076401.
- [4] 许河秀, 王彦朝, 王朝辉, 等. 基于多元信息的多功能电磁集成超表面研究进展[J]. 雷达学报, 2021, 10(2): 191-205.
- [5] GLYBOVSKI S B, TRETYAKOV S A, BELOV P A, et al. Metasurfaces: From Microwaves to Visible [J]. Physics Reports, 2016, 634: 1-72.
- [6] HE Q, SUN S L, XIAO S Y, et al. High-Efficiency Metasurfaces: Principles, Realizations, and Applications [J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(19):1800415.
- [7] KHORASANINEJAD M, AIETA F, KANHAIYA P, et al. Achromatic Metasurface Lens at Telecommunication Wavelengths [J]. Nano Letters, 2015, 15(8): 5358-5362.
- [8] KHORASANINEJAD M, CHEN W T, DEVLIN R C, et al. Metalenses at Visible Wavelengths: Diffraction-Limited Focusing and Subwavelength Resolution Imaging[J]. Science, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [9] SHRESTHA S, OVERVIG A C, LU M, et al. Broadband Achromatic Dielectric Metalenses [J]. Light: Science & Applications, 2018(7):85.
- [10] SUN S L, YANG K Y, WANG C M, et al. High-Efficiency Broadband Anomalous Reflection by Gradient Meta-Surfaces [J]. Nano Letters, 2012, 12(12): 6223-6229.
- [11] WU P C, TSAI W Y, CHEN W T, et al. Versatile Polarization Generation with an Aluminum Plasmonic Metasurface [J]. Nano Letters, 2017, 17(1): 445-452.
- [12] XU H X, SUN S L, TANG S W, et al. Dynamical Control on Helicity of Electromagnetic Waves by Tunable Metasurfaces[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 27503.
- [13] NI X J, KILDISHEV A V, SHALAEV V M. Metasurface Holograms for Visible light[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2807.
- [14] PU M, CHEN P, WANG C, et al. Broadband Anomalous Reflection Based on Gradient Low-Q Meta-Surface [J]. AIP Advances, 2013, 3(5): 052136.
- [15] SIMA B Y, MOMENI HASAN ABADI S M A, BEHDAD N. A Reflective-Type, Quasi-Optical Metasurface filter[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 122(6): 064901.
- [16] CHEN J E, CHENG Q A, ZHAO J E, et al. Reduction of Radar Cross Section Based on a Metasurface [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2014, 146: 71-76.
- [17] 张磊, 陈晓晴, 郑熠宁, 等. 电磁超表面与信息超表面[J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 817-828.
- [18] GAO L H, CHENG Q A, YANG J, et al. Broadband Diffusion of Terahertz Waves by Multi-Bit Coding Metasurfaces[J]. Light: Science & Applications, 2015, 4(9): e324.
- [19] ZHAO J M, SIMA B Y, JIA N, et al. Achieving Flexible Low-Scattering Metasurface Based on Randomly Distribution of Meta-Elements[J]. Optics Express, 2016, 24(24): 27849-27857.
- [20] SIMA B Y, CHEN K, LUO X Y, et al. Combining Frequency-Selective Scattering and Specular Reflection Through Phase-Dispersion Tailoring of a Metasurface [J]. Physical Review Applied, 2018, 10(6): 064043.
- [21] 苏健, 钱震, 李斌. 数字孪生使能的智能超表面边缘计算网络任务卸载[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(7): 2416-2424.
- [22] 王朝辉, 许河秀, 逢智超, 等. 基于3D打印技术的任意曲面共形超表面隐身衣[J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(1): 210-217.
- [23] ARBABI A, ARBABI E, HORIE Y, et al. Planar Metasurface Retroreflector [J]. Nature Photonics, 2017, 11(7): 415-420.
- [24] YANG F, JHA P K, AKBARI H, et al. A Hybrid Coupler for Directing Quantum Light Emission with High Radiative Purcell Enhancement to a Dielectric Metasurface Lens [J]. Journal of Applied Physics, 2021, 130(16): 163103.
- [25] KAUR S, KARMAKAR S, JANA A, et al. Hybridization of Dark Resonant States in Terahertz Metasurfaces [J]. Journal of Applied Physics, 2021, 130(24): 243101.
- [26] 双雅, 李力, 王卓, 等. 基于超表面的智能电磁感知: 理论、系统与实验[J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 858-866, 816.
- [27] CAI T, WANG G M, ZHANG X F, et al. Ultra-Thin Polarization Beam Splitter Using 2-D Transmissive Phase Gradient Metasurface [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(12): 5629-5636.
- [28] TSITSAS N L, VALAGIANNOPOULOS C A. Anomalous Reflection of Visible Light by All-Dielectric Gradient Metasurfaces[J]. Josa B, 2017, 34(7): D1-D8.
- [29] LI Z Y, KIM M H, WANG C, et al. Controlling Propagation and Coupling of Waveguide Modes Using Phase-Gradient Metasurfaces[J]. Nature Nanotechnology, 2017, 12(7): 675-683.
- [30] DEVLIN R C, KHORASANINEJAD M, CHEN W T, et al. Broadband High-Efficiency Dielectric Metasurfaces for the Visible Spectrum[J]. Proceedings of

- the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(38): 10473-10478.
- [31] ZHOU M, BELLING S W, CHEN H T, et al. Coupled Mode Theory for Metasurface Design [C]// Metamaterials, Metadevices, and Metasystems 2019. San Diego, California: SPIE, 2019: 127-133.
- [32] YU C Y, ZENG Q C, YU C J, et al. Scattering Analysis and Efficiency Optimization of Dielectric Pancharatnam-Berry-Phase Metasurfaces [J]. Nanomaterials, 2021, 11(3): 586.
- [33] LI Y, HONG M H. Diffractive Efficiency Optimization in Metasurface Design via Electromagnetic Coupling Compensation [J]. Materials, 2019, 12(7): 1005.
- [12] MANSOUREE M, MCCLUNG A, SAMUDRALA S, et al. Large-Scale Parametrized Metasurface Design Using Adjoint Optimization [J]. ACS Photonics, 2021, 8(2): 455-463.
- [35] DÍAZ-RUBIO A, ASADCHY V S, ELSAKKA A, et al. From the Generalized Reflection Law to the Realization of Perfect Anomalous Reflectors [J]. Science Advances, 2017, 3(8): e1602714.
- [36] WONG A M H, ELEFTHERIADES G V. Perfect Anomalous Reflection with an Aggressively Discretized Huygens' Metasurface [C]// 2017 32nd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-3.
- [37] KWON D H, TRETYAKOV S A. Perfect Reflection Control for Impenetrable Surfaces Using Surface Waves of Orthogonal Polarization [J]. Physical Review B, 2017, 96(8): 085438.
- [38] RA'DI Y, SOUNAS D L, ALÙ A. Metagratings: Beyond the Limits of Graded Metasurfaces for Wave Front Control [J]. Physical Review Letters, 2017, 119(6): 067404.
- [39] 于立. 基于新型人工电磁表面的涡旋电磁波天线研究与设计[D]. 北京:北京邮电大学, 2020.

(编辑:徐楠楠)

《空军工程大学学报》持续入选中国科学引文数据库(CSCD)

近日,中国科学院文献情报中心发布了2023—2024年度中国科学引文数据库(Chinese Science Citation Database, 简称CSCD)来源期刊遴选结果,《空军工程大学学报》(原《空军工程大学学报·自然科学版》)持续入选中国科学引文数据库(CSCD)。

CSCD是我国第一个引文数据库,收录我国出版的中、英文核心期刊1300余种,覆盖自然科学、工程技术、医学等学科领域,在发现我国重要科学研究成果、追踪科学研究过程中发挥了重要的信息导航作用。CSCD与科睿唯安、爱思唯尔合作,成为我国唯一一个与Web of Science(SCI)、Scopus合作的文献数据库,向全球推广中国期刊。CSCD来源期刊遴选委员会成员由学术领域科研专家、期刊出版、编辑专家、文献计量专家组成,每两年遴选一次,来源期刊数量为我国自然科学、工程技术、医学等领域出版总量的25%左右。

中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊 收录证书

空军工程大学学报

依据文献计量学的理论和方法,通过定量与定性相结合的综合评审,贵刊被收录为中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊,特颁发此证书。

证书编号: CSCD2023-676
有效期: 2023年-2024年
发证日期: 2023年6月
查询网址: www.sciencechina.cn

