

低频比波长复用高效双功能超表面

逢智超, 许河秀*, 罗慧玲, 王朝辉, 王彦朝, 徐 硕, 徐 健

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 多功能微波器件由于能在小尺寸器件上实现大容量功能集成, 在现代通信系统中具有重要作用。然而由于器件功能的高度集成, 使得多功能器件往往存在严重的通道串扰, 降低了器件效率。对此, 提出了一种低通道串扰的频率复用方法, 通过在两层介质板上构建互补形式的双 C 形开槽谐振器和双 C 形金属谐振器, 实现了双谐振单元。由于双谐振器具有很高的 Q 值, 能在低频比情形下实现相位的独立调控。为进行验证并探索应用, 设计了工作于 $f_1=9.2$ GHz 和 $f_2=11.2$ GHz 的多功能超表面。仿真结果与实验结果吻合良好, 表明超表面在 f_1 和 f_2 处分别实现了模式数 $l=3$ 的聚焦 OAM 波束和零阶贝塞尔波束。与以往报道的多功能超表面相比, 设计的器件双频工作频比仅为 1.2, 且双频器件效率高达 86.1% 和 93%。提出的低频比、低通道串扰波长复用超表面方法为实现大容量功能集成应用提供了一种有效途径。

关键词 超表面; 波长复用; 低串扰; 聚焦 OAM 波束; 贝塞尔波束

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2022.05.009

中图分类号 TN011 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2022)05-0057-07

Wavelength Multiplexed Dual-Function Metasurface with Low Frequency Ratio

PANG Zhichao, XU Hexiu*, LUO Huiling, WANG Zhaohui, WANG Yanzhao, XU Shuo, XU Jian
(Air Defense and Antimissile School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract Multi-functional microwave devices play an important role in modern communication systems because they can achieve large-capacity function integration in small-sized devices. However, multifunctional devices often exhibits serious channel crosstalk due to the high integration, which significantly reduces the device efficiency. Here, a frequency multiplexing method with low channel crosstalk is proposed. A double C-shaped slot resonator and a double C-shaped metal resonator are utilized in a complementary form on two dielectric boards for realizing a hybrid meta-atom with double operation modes. The high Q value being achieved in hybrid resonator, the phase can be controlled independently at two operation bands with low frequency ratio. To verify the concept and explore possible applications, a bifunctional metasurface with two distinct functions are designed at $f_1=9.2$ GHz and $f_2=11.2$ GHz. The numerical results are in good agreement with the experimental ones, indicating a focused OAM beam with mode number $l=3$ at f_1 and a zero-order Bessel beam at f_2 . Compared with the previously reported wavelength multiplexing devices, the frequency ratio of dual-operation modes here is only 1.2, and the efficiency is measured as 86.1% and 93%

收稿日期: 2022-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(62171459); 国防科学基金(2019-JCJQ-JJ-081); 陕西省自然科学基金重点项目(2020JZ-33)

作者简介: 逢智超(1997—), 男, 吉林白城人, 硕士生, 研究方向为超表面研究。E-mail: psw0312@163.com

通讯作者: 许河秀(1985—), 男, 江西九江人, 教授, 研究方向为超材料/超表面电磁调控与雷达天线、隐身应用。E-mail: hxxuellen@gmail.com

引用格式: 逢智超, 许河秀, 罗慧玲, 等. 低频比波长复用高效双功能超表面[J]. 空军工程大学学报, 2022, 23(5): 57-63. PANG Zhichao, XU Hexiu, LUO Huiling, et al. Wavelength Multiplexed Dual-Function Meta-Surface with Low Frequency Ratio [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2022, 23(5): 57-63.

respectively. The wavelength multiplexing method with low frequency ratio and low channel crosstalk provides an effective avenue in high-capacity integrated function application.

Key words metasurface; wavelength multiplexing; low crosstalk; focusing OAM beam; Bessel beam

随着通信系统的快速发展,传统多功能微波器件被广泛地应用在信号传输、成像系统等集成设备中,但因其存在体积大、损耗高、效率低等问题,并不符合微波器件的鲁棒性和实用性。相比较而言,具有亚波长厚度的超表面却具有对电磁波的幅度、相位和极化良好的调控能力^[1-3]。对于传统光学透镜依靠距离传输获得相位积累,超表面通过与入射电磁波的共振耦合即可获得突变相位^[4-5],展现出超表面对电磁波强大的操控能力。因为超表面优越的电磁调控性能,使其在光束异常反射/折射^[6]、雷达散射截面减缩(RCS)^[7]、全息^[8]、聚焦^[9]和涡旋光束发生器^[10]等方面都取得了重要进展。

为提高设备的集成度和紧凑性,研究人员广泛开展关于多功能超表面器件^[11-21]的研究。目前主要通过电磁波对超表面激励信息(如频率、极化、方向和位置)来实现多功能^[11]。其中,频率是电磁波携带的重要信息,频率复用使得器件具有高效的频谱利用率,使得频率多功能超表面在电磁调控方面得到广泛应用。虽然频率多功能超表面能在多个频带实现功能的集成以应对不同的工作环境,但大多数频率多功能超表面单元都是依靠多个金属谐振器在单层介质上拼接或在多层介质上利用空间复用(透、反射集成)等方法来实现多功能。这种方法由于通道与通道之间不可避免会存在串扰,会降低效率。为避免串扰,这就要求频率多功能超表面的每个工作频段不能相距太近。

针对上述问题,本文提出了一种基于高 Q 值的低频比波长复用高效互补谐振器反射单元设计方案。其单元由双层介质板与印刷在不同介质板上的 2 个互补形金属谐振器以及金属地板组成。

1 单元设计与分析

为使单元在不同谐振频率处实现高效且独立地圆极化波前调控,设计了一种波长复用的高效互补谐振器单元,结构为双 C 形开槽谐振器—介质板—双 C 形金属谐振器—介质板—金属地板,见图 1。其中 2 层介质板采用厚度为 $H_1=1.5$ mm 和 $H_2=1.5$ mm 的 F4B 介质($\epsilon_r=2.65$, $\tan\delta=0.001$),其具有正切损耗小、色散小、成本低等优点。谐振器和金属地板的材料为铜,厚度为 0.036 mm,电导率 $\sigma=5.8\times 10^7$ S/m。为在 $f_1=9.2$ GHz 和 $f_2=11.2$

GHz 两个谐振频率处实现最大反射幅度,通过仿真优化得到最终单元双 C 形开槽谐振器参数 $r_1=4.75$ 、 $r_2=4.35$ 、 $w_1=0.3$ 、 $w_2=0.4$ 和 $g_1=0.9$ mm;双 C 形金属谐振器参数 $r_3=3.0$ 、 $w_3=0.8$ 和 $g_2=0.3$ mm;单元周期 $P=10.2$ mm。

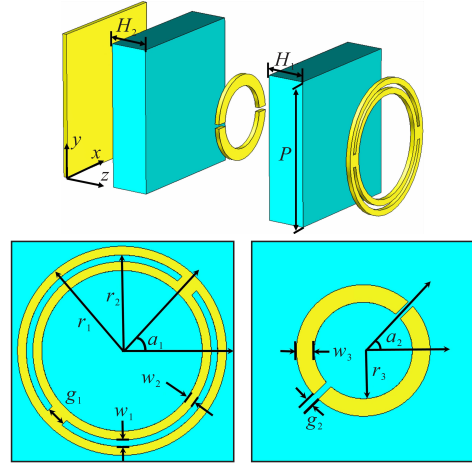


图 1 互补谐振器单元结构

为进一步解释单元在圆极化波垂直入射下的高效工作原理,引入线极化波反射模式下的琼斯矩阵 $\mathbf{J}=\begin{bmatrix} r_{xx} & 0 \\ 0 & r_{yy} \end{bmatrix}$,其中 r_{xx} , r_{yy} 为 x 、 y 极化波复反射幅度。因圆极化波能分解为 2 个相互正交、幅值相等且相位相差 90° 的线极化波,故右旋圆极化波可表示为 $\mathbf{E}_i = \mathbf{E}_0 e^{-jkz} \begin{pmatrix} x \\ jy \end{pmatrix}$ 。当谐振器旋转角度 θ 时,对应的琼斯矩阵变为 $\mathbf{J}_\theta = \mathbf{R}_\theta \mathbf{J} \mathbf{R}_\theta^{-1}$,其中 $\mathbf{R}_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$ 为旋转矩阵,当谐振器逆时针旋转时 $\theta > 0$,反之 $\theta < 0$ 。在右旋圆极化波入射下,谐振器的反射电磁波可表示为:

$$\mathbf{E}_r = \frac{\mathbf{E}_0}{2} e^{jkz} (r_{xx} e^{j\varphi_{xx}} - r_{yy} e^{j\varphi_{yy}}) e^{j2\theta} \begin{pmatrix} x \\ jy \end{pmatrix} +$$

$$\frac{\mathbf{E}_0}{2} e^{jkz} (r_{xx} e^{j\varphi_{xx}} + r_{yy} e^{j\varphi_{yy}}) \begin{pmatrix} x \\ -jy \end{pmatrix} \quad (1)$$

由式(1)可知,反射波存在左旋和右旋圆极化分量且交叉极化反射分量携带几何相位因子 $e^{j2\theta}$,说明谐振器旋转 θ 就会使交叉极化波反射相位增加 2θ 。因此,通过旋转对应谐振器,交叉极化反射波在谐振频率处就会实现 $0\sim 2\pi$ 的相位覆盖。为实现 100% 圆极化波交叉极化反射,通过式(1)可得出在 x 、 y 线极化入射下,其反射波幅度和相位需要满足如下

条件:

$$\begin{cases} |r_{xx}| = |r_{yy}| = 1 \\ |\varphi_{xx} - \varphi_{yy}| = \pi \end{cases} \quad (2)$$

为验证设计单元满足圆极化波交叉极化反射幅度和相位条件,通过时域有限差分法(finite difference time domain, FDTD)进行仿真计算。仿真过程中,以 x 、 y 正交线极化波垂直照射单元,沿 x 、 y 方向的两个边界设置为周期边界条件,仿真结果如图 2 所示。可以看出, x 、 y 极化波入射下,谐振频率 f_1 处主要为双 C 形开槽谐振器参与谐振,而 f_2 谐振频率处主要为双 C 形金属谐振器参与谐振。在不同谐振频率 f_1 、 f_2 反射场中反射幅度 r_{xx} 、 r_{yy} 均大于 0.92,均可视为接近于 1。与此同时, x 、 y 极化波反射相位 φ_{xx} 与 φ_{yy} 在 8~10 GHz 和 10~12 GHz 的频段范围内相位差值保持均匀变化,并在 f_1 与 f_2 处稳定保持在 180° 左右,满足式(2) x 、 y 线极化反射波激发下的幅度和相位条件,保证了圆极化波照射下单元的高效率交叉极化反射。

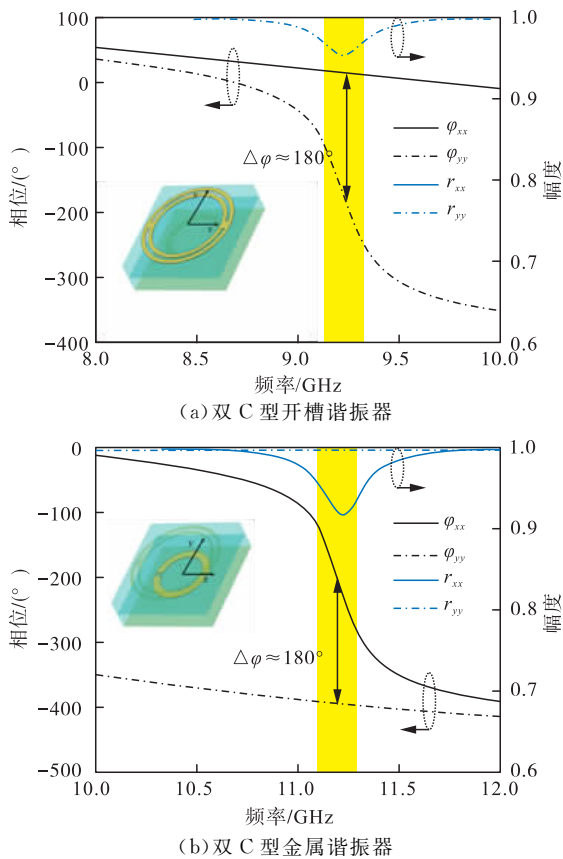
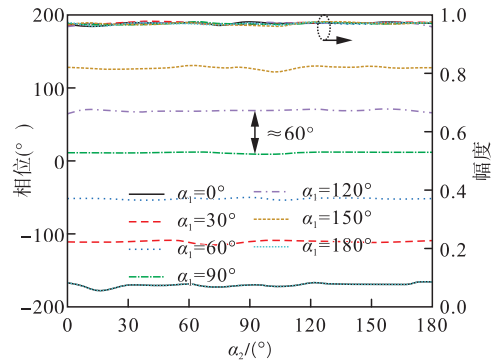
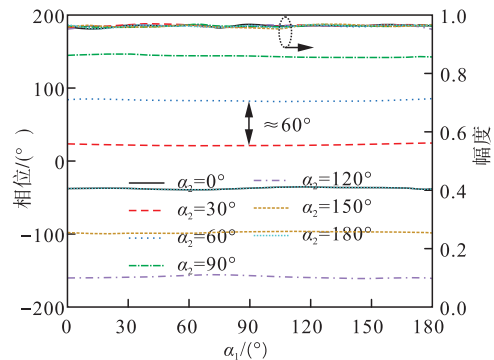


图 2 x 、 y 极化波入射下互补谐振器单元的电磁响应频谱
为证明圆极化波入射下,通过双 C 形开槽谐振器与双 C 形金属谐振器在 $f_1 = 9.2$ GHz 和 $f_2 = 11.2$ GHz 处能实现几何相位的独立调控,以右旋圆极化波垂直入射为例,对单元进行仿真。设双 C 形开槽谐振器从初始位置逆时针旋转 α_1 ,双 C 形金属谐振器逆时针旋转 α_2 ,旋转步进为 30° 。由仿真

结果图 3(a)和图 3(b)所示,双 C 形开槽谐振器与双 C 形金属谐振器在谐振频率 f_1 与 f_2 处彼此之间互不影响,保持着良好的独立调控。在谐振频率 $f_1 = 9.2$ GHz 处,随着双 C 形金属谐振器旋转角度的改变,不同 α_1 的双 C 形开槽谐振器的反射幅度趋近于 1 且反射相位几乎不随 α_2 变化,同时其反射相位差与旋转角 α_1 满足 2 倍几何相位关系。同理在谐振频率 $f_2 = 11.2$ GHz 处,随着双 C 形开槽谐振器旋转角度的改变,不同 α_2 的双 C 形金属谐振器的反射幅度与相位可以得到相同结论。通过对双 C 形开槽谐振器与双 C 形金属谐振器在谐振频率 f_1 与 f_2 处不同转角下的反射相位误差进行计算,得出其均小于 8° ,因此可忽略因串扰而产生的影响,使得单元能在不同谐振频率处具有良好的独立相控能力。



(a) 不同 α_1 的互补谐振器单元随 α_2 变化的反射相位与幅度



(b) 不同 α_2 的互补谐振器单元随 α_1 变化的反射相位与幅度

图 3 互补谐振器单元随角度变化的电磁响应

对于互补谐振器单元的几何相位能否在 f_1 与 f_2 处到 2π 相位覆盖,从图 4(a)和图 4(b)仿真结果可以得出。在谐振频率 f_1 和 f_2 处,随着双 C 形开槽谐振器的转角 α_1 与双 C 形金属谐振器的转角 α_2 从 0° 变化到 180° ,双 C 形开槽谐振器与双 C 形金属谐振器的几何相位成功达到 2π 相位覆盖,不同旋转角度的谐振器在工作频率处彼此之间的相位差满足 2 倍转角关系,符合几何相位原理,且反射幅度在工作频率处高达 0.98。以上结果充分表明高效互补谐振器单元有独立调控不同频率圆极化电磁波的能力,为设计多功能超表面打下了基础。

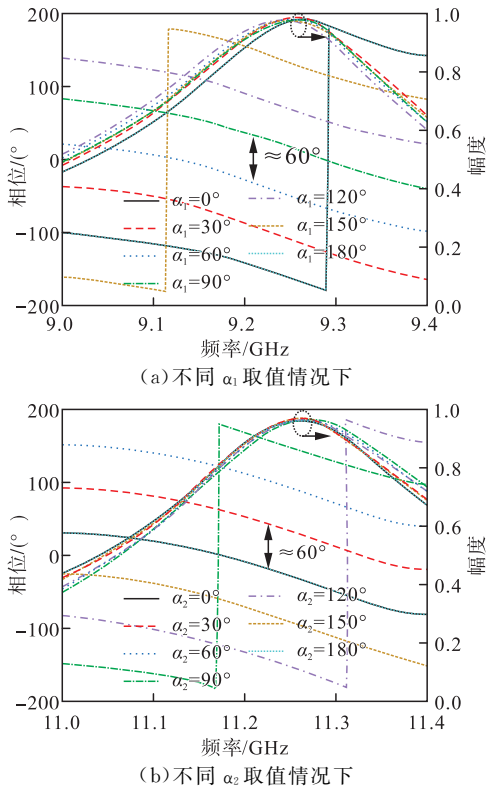


图4 互补谐振器单元随频率变化的电磁响应

2 多功能超表面设计与仿真结果

由于高效互补谐振器单元具有良好的双频电磁特性和相位独立调控能力,本文在 $f_1 = 9.2$ GHz 和 $f_2 = 11.2$ GHz 处设计了具有模式数 $l = 3$ 的聚焦 OAM 波束和零阶贝塞尔波束的高效率双功能频率复用超表面,其中超表面总尺寸为 $357 \text{ mm} \times 357 \text{ mm}$,包含 35×35 个单元。为验证圆极化波垂直入射下超表面的优越性能,以右旋圆极化波入射为例,并利用 CST 对超表面进行近场仿真验证。

2.1 模式数 $l = 3$ 的聚焦 OAM 波束

虽然 OAM 波束因其模式数 l 的不同能够在单频率中多信道传输,但也存在传播距离增加,模式数 l 升高而使波束快速发散的问题。为此多功能超表面在 $f_1 = 9.2$ GHz 处实现模式数 $l = 3$ 的聚焦 OAM 波束。

根据相位叠加原理,模式数 $l = 3$ 的聚焦 OAM 波束相位分布可以分为聚焦相位与涡旋相位两部分的叠加。针对聚焦相位部分,单元反射相位需满足:

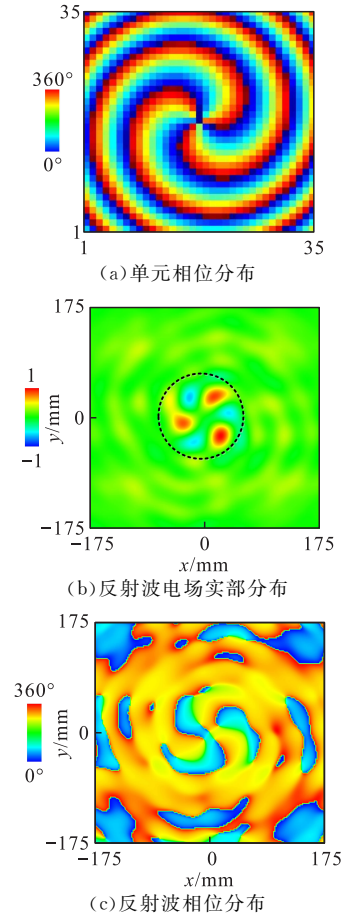
$$\varphi_1(m, n) = \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{(mp)^2 + (np)^2} + f_0^2 - f_0^2) + \varphi_0 \quad (3)$$

式中: $f_0 = 214 \text{ mm}$ 为焦距; p 为单元的周期; λ 为入射电磁波的波长; φ_0 为任意相位响应; $m(n)$ 为单元沿 $x(y)$ 方向距原点的单元数目。

针对涡旋相位部分,单元反射相位分布需满足:

$$\varphi_2(m, n) = l \times \arctan\left(\frac{m}{n}\right) \quad (4)$$

式中: l 为 OAM 波束的模式数。依据相位叠加原理,通过改变单元中双 C 形开槽谐振器的旋转角度 α_1 使反射波相位满足如图 5(a) 所示分布。通过对超表面进行近场仿真,得到在焦平面 ($f_0 = 214 \text{ mm}$) 处反射波电场实部图 5(b) 和相位图 5(c)。图 5(b) 显示出电场明显聚焦于焦点处且波束具有与模式数 $l = 3$ 相等的螺旋臂数目,相位图 5(c) 显示出波束具有与 l 数量一致的 1080° 相位变化,这与焦平面处的成波特行相吻合。

图5 模式数 $l = 3$ 的聚焦 OAM 波束设计和仿真结果

针对近场仿真模式数 $l = 3$ 的聚焦 OAM 波束效率,采用下式计算:

$$\eta_f = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \cdot \frac{P_{\text{foc}}}{P_{\text{fop}}} \quad (5)$$

式中: $\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}$ 定义为完全反射波功率与入射波功率之比; $\frac{P_{\text{foc}}}{P_{\text{fop}}}$ 为焦平面处焦点功率与焦平面总功率之比,其中焦点功率为以焦点为圆心,主瓣半功率宽度为半径包围的圆功率积分,其积分区域如图 5(c) 所示。经计算可得 $\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = 98\%$, $\frac{P_{\text{foc}}}{P_{\text{fop}}} = 89\%$,最终计算得到聚焦 OAM 波束的仿真效率为 $\eta_f = 87.5\%$ 。其效率未能达到 100% 的主要原因为部分电磁波因

衍射未参与聚焦而使得聚焦效率较低。

2.2 零阶贝塞尔波束

零阶贝塞尔波束因其具有方向性好、长焦深和传输距离远等优点, 被广泛应用于长距离通信中, 为此在 $f_2 = 11.2$ GHz 处将超表面设计为具有零阶贝塞尔波束功能。

反射零阶贝塞尔波束的相位满足下式:

$$\varphi_b = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(mp)^2 + (np)^2} \sin(\beta) \quad (6)$$

式中: $\beta = 30^\circ$ 为零阶贝塞尔波束的衍射半角。通过改变双 C 形金属谐振器的旋转角度 α_2 使高效互补谐振器单元相位满足如图 6(a) 所示相位分布。根据贝塞尔波束成波原理图 6(b) 所示, 可知零阶贝塞尔波束主要由与 z 轴正方向夹角为 β 的反射平行波在无衍射距离内叠加形成, 因此通过图中几何关系可以得到最大无衍射距离为 $Z_{\max} = \frac{D/2}{\tan\beta} = 309$ mm。从图中

可知该方法形成的贝塞尔波束能量主要集中于以超表面中心为圆心, 半径为 $D/4$, 高度为 Z_{\max} 的圆柱内, 其中 $Z_{\max}/2$ 为能量密度最大位置。

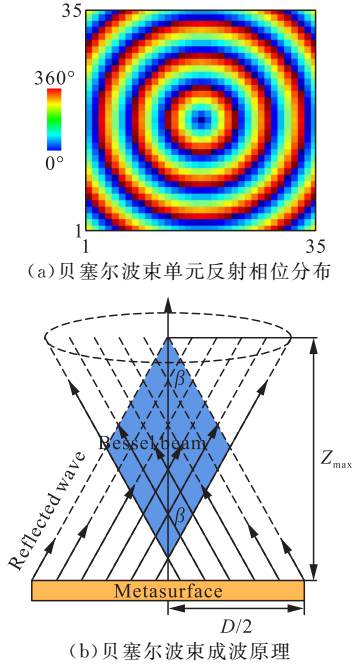


图 6 零阶贝塞尔波束设计和原理

为证明上述贝塞尔波束能量分布特性, 通过下式计算波束能量集中效率来进行验证。

$$\eta_b = \frac{\oint \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dP_2}{\oint \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dP_1} \quad (7)$$

式中: P_2 是超表面上方同一位置处同一平面内无衍射波束区域(平面中心为圆心, 半径为 $D/4$ 的圆形区域); P_1 为同一平面内超表面口径面积(边长为 D 的方形区域, 与超表面等大)。为计算传输方向不同位置的波束能量集中效率, 取 $Z_1 = 75$ mm、 $Z_2 =$

150 mm、 $Z_3 = 225$ mm 和 $Z_4 = 309$ mm 4 个位置处 xoy 面的 $|E_{\text{LCP}}|^2$ 归一化分布, 如图 7 所示。图中显示在波束传播方向的能量较为集中, 在不同位置横截面的中心处都具有最大能量强度, 且横向能量在偏离中心位置时逐渐振荡减小, 符合贝塞尔函数曲线的振荡趋势。通过计算, 得出在 $Z_1 = 75$ mm、 $Z_2 = 150$ mm、 $Z_3 = 225$ mm 和 $Z_4 = 309$ mm 4 个位置处的纵向贝塞尔波束能量集中效率依次为 82%, 92%, 85% 和 73%, 这与贝塞尔波束能量随传输距离先略微增大而后略微减小的无衍射传输特性相符。为进一步证明器件的优越性能, 提取 $Z_1 = 75$ mm、 $Z_2 = 150$ mm、 $Z_3 = 225$ mm 和 $Z_4 = 309$ mm 4 个位置处 $x=0$ 的 $|E_{\text{LCP}}|^2$ 归一化强度分布, 如图 8 所示。由图可知, 主瓣中 $|E_{\text{LCP}}|^2$ 强度随位置 Z 的距离增大出现先增大后减小的趋势, 且不同位置的副瓣也具有相同现象。这与零阶贝塞尔波束的成波特性完全相符。

综上所述, 多功能超表面仿真较好地实现了在 $f_1 = 9.2$ GHz 与 $f_2 = 11.2$ GHz 处模式数 $l=3$ 的聚焦 OAM 波束与零阶贝塞尔波束。

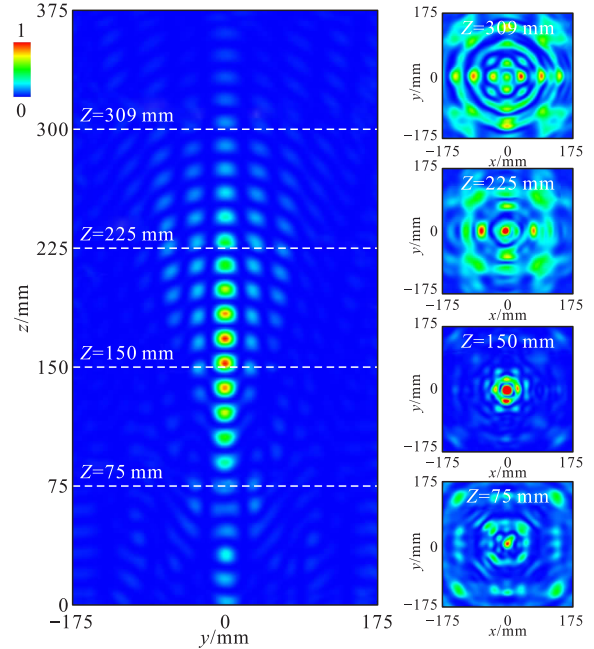


图 7 零阶贝塞尔波束不同位置 $|E_{\text{LCP}}|^2$ 归一化分布图

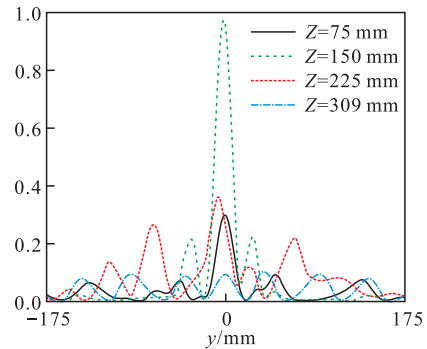


图 8 贝塞尔波束不同 xoy 面 $y=0$ 处 $|E_{\text{LCP}}|^2$ 归一化分布曲线

3 实验结果

为验证本文提出的设计方法以及分析多功能超表面的实际性能,我们对其加工并进行了近场实验测试。其中超表面样品如图 9(a)所示,近场实验测试环境如图 9(b)所示。在实验过程中,以右旋圆极化透镜天线作为发射天线,右旋喇叭天线作为接收天线放置在超表面和透镜天线之间,并采用 AV3672 矢量网络分析仪来记录数据。为避免入射波电磁场与超表面反射波电磁场的叠加而使数据出现误差,通过对入射波电磁场进行记录,并用经超表面样品反射的总场减去入射波电磁场,从而得到目标样品在不同工作频率 f_1 与 f_2 的近场散射数据。

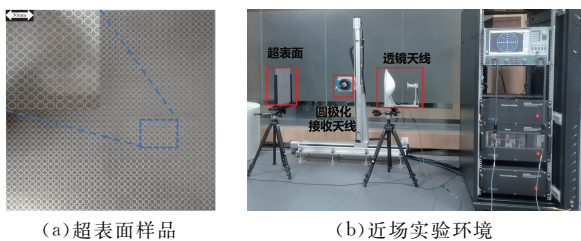


图 9 超表面实验测试环境

通过对工作频率 f_1 与 f_2 的近场数据进行分析,得到 f_1 频率处的焦平面波束电场其归一化模值、电场相位测试结果如图 10(a)和 10(b)所示。从图 10(a)可以清晰看出 3 个螺旋臂,与模式数 $l=3$ 相匹配,同时能量在中心并未出现涡旋波束的奇点凹空,没有发散,表明电磁波能量经超表面反射后聚焦于焦平面处,显示了非常好的聚焦效果。从图 10(b)可以看出,沿口径一周相位变化 $1\ 080^\circ$,符合模式数 $l=3$ 的相位变化,与仿真结果吻合良好。同时通过实验数据计算聚焦效率 $\eta_t=86.1\%$,与仿真效率相比存在 1.4% 的偏差,可以忽略不计。

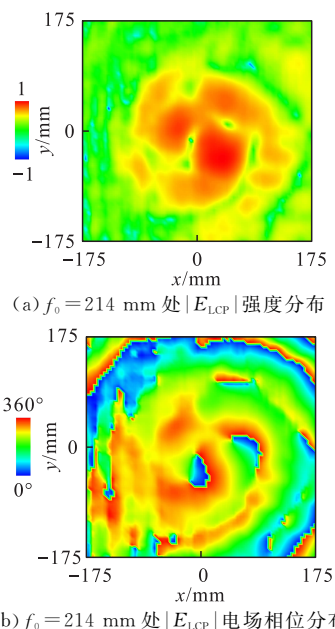


图 10 模式数 $l=3$ 的聚焦 OAM 波束近场测试结果

通过对工作频率 f_2 处近场实验数据分析,得到不同位置的 xoy 面和 $yozy$ 面的 $|E_{LCP}|^2$ 归一化分布如图 11 所示。由图可知,实验测试零阶贝塞尔波束最大无衍射距离与仿真数值相近,且在无衍射距离内波束传播方向的能量较为集中,这与仿真结果相吻合。对于 Z 分别为 75、150、214 和 309 mm 时 4 个不同位置的能量分布图,其中心处都具有强能量分布,且中心光斑随位置变化先增大后减小,这与仿真结果完全相吻合。

为表征样品实测性能,通过对 4 个观察面内的波束能量集中效率进行计算,得出效率 η_b 分别等于 82% 、 93% 、 83% 和 72% ,与仿真效率非常接近,误差小于 2% ,实验结果与仿真结果吻合良好,且符合贝塞尔波束的能量分布特征。实验与仿真结果之间的微小偏差主要来源于加工误差、非理性平面波、非垂直入射、发射与接收天线间耦合等。虽因误差导致了实验结果存在偏差,但在误差允许范围内,超表面功能很好地达到了预期效果,验证了本文设计方法的可行性和准确性。

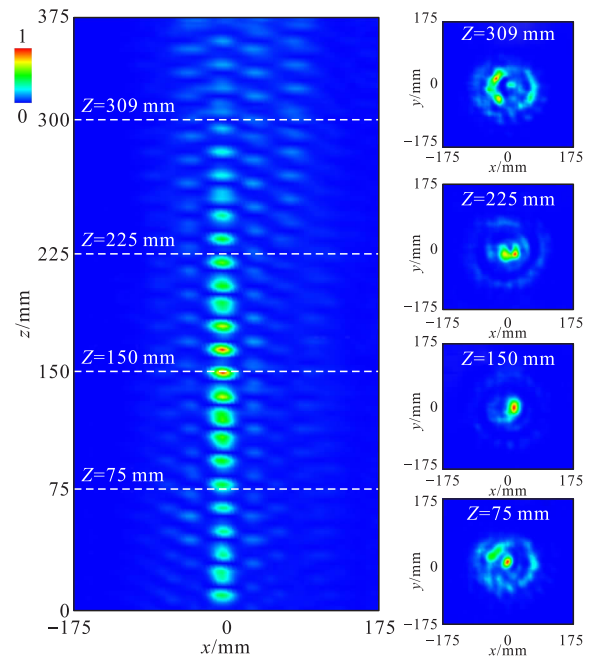


图 11 零阶贝塞尔波束近场实验 $|E_{LCP}|^2$ 归一化分布图

4 结语

本文通过高 Q 值互补形式的双 C 形开槽谐振器和双 C 形金属谐振器构建了一种双层结构的频率复用高效互补谐振器单元,并且通过旋转不同层的谐振器使单元能在 $f_1=9.2$ GHz 和 $f_2=11.2$ GHz 谐振频率处独立地实现 2π 相位覆盖。单元不仅在不同的谐振频率处保持着良好的独立,而且实现了高效率的几何相位调控。基于单元良好的性

能,通过对单元的周期性排布设计了工作在谐振频率处 f_1 和 f_2 的多功能超表面,并分别在 f_1 、 f_2 处实现了模式数 $l=3$ 的聚焦 OAM 波束和零阶贝塞尔波束。通过对多功能超表面进行仿真与实验测试,得出测量结果和实验结果一致,且在 f_1 、 f_2 处的实验效率高达 86.1% 和 93%,证明了多功能超表面的优越性能,同时也为 OAM 波束产生,为紧凑、高效多功能集成器件设计提供了新途径。

参考文献

- [1] XU H X, HU G, HAN L, et al. Chirality-Assisted High-Efficiency Metasurfaces with Independent Control of Phase, Amplitude, and Polarization[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018; 1801479.
- [2] ZHANG L, MEI S, HUANG K, et al. Advances in Full Control of Electromagnetic Waves with Metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(6): 818-833.
- [3] YU N, CAPASSO F. Flat Optics with Designer Meta Surfaces [J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.
- [4] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, et al. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 84(18):4184-4187.
- [5] 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.
- [6] HUANG L, CHEN X, MÜHLENBERND H, et al. Dispersionless Phase Discontinuities for Controlling Light Propagation[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(11): 5750-5755.
- [7] AI-NUAIMI M K T, HONG W, WHITTOW W G. Aperiodic Sunflower-Like Metasurface for Diffusive Scattering and RCS Reduction[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(7): 1048-1052.
- [8] WEN D, YUE F, LI G, et al. Helicity Multiplexed Broadband Metasurface Holograms[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 1-7.
- [9] XU H X, TANG S, WANG G, et al. Multifunctional Microstrip Array Combining a Linear Polarizer and Focusing Metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(8): 3676-3682.
- [10] ZHANG L, LIU S, LI L, et al. Spin-Controlled Multiple Pencil Beams and Vortex Beams with Different Polarizations Generated by Pancharatnam-Berry Coding Metasurfaces[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(41): 36447-36455.
- [11] 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.
- [12] BAO L, FU X, WU R Y, et al. Full-Space Manipulations of Electromagnetic Wavefronts at Two Frequencies by Encoding Both Amplitude and Phase of Metasurface[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 6(4): 2001032.
- [13] WANG T, ZHAI G, XIE R, et al. Dual-Band Terahertz Auto-Focusing Airy Beam Based on Single-Layer Geometric Metasurfaces with Independent Complex Amplitude Modulation at Each Wavelength[J]. *Advanced Theory and Simulations*, 2019, 2(7): 1900071.
- [14] XU H, TANG S, WANG G. Multifunctional Microstrip Array combining a Linear Polarizer and Focusing Metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(8): 3676-3682.
- [15] DING F, DESHPANDE R, BOZHEVOLNYI S I. Bifunctional Gap-Plasmon Metasurfaces for Visible Light: Polarization-Controlled Unidirectional Surface Plasmon Excitation and Beam Steering at Normal Incidence[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(4): 17178.
- [16] BOROVIKS S, DESHPANDE R A, MORTENSEN N A, et al. Multifunctional Metamirror: Polarization Splitting and Focusing[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1648-1653.
- [17] XU H X, HU G, JIANG M, et al. Wavevector and Frequency Multiplexing Performed by a Spin-Decoupled Multichannel Metasurface[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(1): 1900710.
- [18] XIE R, FANG X, ZHANG D, et al. Four-Channel Kaleidoscopic Metasurfaces Enabled by a Single-Layered Single-Cell Quad-Band Meta-Atom[J]. *Advanced Theory and Simulations*, 2022, 5(3): 2100301.
- [19] LUO X, HU Y, LI X, et al. Integrated Metasurfaces with Microprints and Helicity-Multiplexed Holograms for Real-Time Optical Encryption[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(8): 1902020.
- [20] WANG B, QUAN B, HE J, et al. Wavelength Demultiplexing Metasurface Hologram[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1-6. doi: 10.1038/srep35657.
- [21] XU X, HAN, LI Y, et al. Completely Spin-Decoupled Dual-Phase Hybrid Metasurfaces for Arbitrary Wavefront Control[J]. *ACS Photonics*, 2018, 6(1): 211-220.

(编辑:徐楠楠)