

一种超宽带反射型极化转换超表面设计

于惠存, 曹祥玉[✉], 高 军, 韩江枫, 周禹龙

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 提出了一种超宽带、反射型极化转换超表面,该极化转换超表面由“H”形周期金属贴片结构,介质板和金属底板组成。通过改变单元结构尺寸,可以使反射波 2 种交叉线极化分量的幅度相同,相位差接近 $\pi/2$ 。仿真与实测结果表明,该极化变换超表面在 6.40~15.40 GHz,17.49~18.14 GHz 频带内能将线极化入射波转换为轴比小于 3 dB 的圆极化反射波;在 15.81~17.26 GHz 频带内能将线极化入射波转换为极化转化率大于 80% 的交叉线极化反射波。该结构具有单元尺寸小,工作频带宽,能量损耗低的特点,可以在有限的平面内加载更多单元结构。该极化变换超表面在电磁波调控、新型天线设计等方面具有一定的应用价值。

关键词 圆极化;极化转换;超宽带;超表面

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.03.011

中图分类号 TN82 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)03-0060-06

A Design of Ultra-Broadband Reflective Polarization Conversion Meta-Surface

YU Huicun, CAO Xiangyu[✉], GAO Jun, HAN Jiangfeng, ZHOU Yulong

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: This paper proposes a design of ultra-broadband reflective polarization conversion meta-surface composed of the shape of “H” metallic periodic structure, a layer dielectric and a metallic plate ground. Almost an equal magnitude and a 90° phase difference generated between the two orthogonal electric components of the reflected waves can be reached by changing the size of the meta-surface cell. The simulation and measurement show that this device can allow linear to convert circular polarization from 6.40 GHz to 15.40 GHz and 17.49 GHz to 18.14 GHz, while the axis ratio is less than 3 dB. This can also realize more than 80% polarization conversion ratio from 15.81 GHz to 17.26 GHz under both x -and y -polarized incidence. The proposed polarization conversion is characterized by a compact structure and simple geometry, a low loss to energy in ultra-broadband, using more unit cell in the available space. This design is of great value to electromagnetic control and design of new antennas.

Key words: circular polarization; polarization conversion; ultra-broadband; meta-surface

随着雷达、卫星、探测、成像等技术的发展,单一的线极化(Linear Polarization, LP)波已远不能满

足需求,因此圆极化(Circular Polarization, CP)波的作用就显得十分重要:在剧烈摆动或滚动的飞行

收稿日期: 2017-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(61471389,61671464,61701523);陕西省自然科学基金(2017JM6025);陕西省高校科协青年人才托举计划(20170107)

作者简介: 于惠存(1994—),男,黑龙江海林人,硕士生,主要从事人工电磁表面、非互易超表面等研究。E-mail: yhc9424@163.com

通信作者: 曹祥玉(1964—),女,河南南阳人,教授,博士生导师,主要从事天线与电磁兼容、人工电磁材料等研究。E-mail: xiangycaokdy@163.com

引用格式: 于惠存,曹祥玉,高军,等:一种超宽带反射型极化转换超表面设计[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2018,19(3):60-65. YU Huicun, CAO Xiangyu, GAO Jun, et al. A Design of Ultra-Broadband Reflective Polarization Conversion Meta-Surface[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(3): 60-65.

器上装置圆极化天线,可以在任何状态下都能收到信号;在天文、航天设备中采用圆极化天线,除了可以减小信号漏失外,还能消除由电离层法拉第旋转效应引起的极化畸变等影响;在电视广播中采用圆极化天线,可克服重影、抑制雨雾的干扰等等^[1]。

人工电磁表面,也称作超材料,通常是指一种周期排列的亚波长结构,它具有天然材料所不具备的物理特性^[2]。目前研究方向主要包括频率选择表面^[3-4]、吸波体^[5-6]、高阻抗表面^[7]、表面等离子激元^[8]、人工磁导体^[9-10]、极化转换超表面^[11-20]等。近年来,宽带线极化-线极化转换超表面被大量报道^[11-14],而宽带线极化-圆极化转换超表面相对较少。

Ghazizadeh 等在 2012 年提出了一种新型基于极化的电磁带隙结构^[15],在 9.94~11.98 GHz 和 13.53~16.57 GHz 2 个频带内,将线极化入射波转换为轴比小于 3 dB 的圆极化反射波。文献^[16]于同年提出了一种基于各向异性超表面的低剖面反射型线到圆极化转换超表面,轴比小于 3 dB 的相对带宽达到 60%。在此基础上文献^[17]利用超材料的各向异性原理,通过调节单元结构尺寸,定量的改变反射波交叉极化分量的相位差,实现了线到线极化转换,线到左(右)旋圆极化转换,提出的线到圆极化转换超表面 3 dB 轴比带宽为 0.32~0.65 THz,相对带宽为 68%。文献^[18]将极化转换超表面与相位梯度表面相结合,设计了一种在 13.8~14.7 GHz 频带内同时具有线-圆极化转换和出射波偏折功能的反射型极化转换超表面。文献^[19]采用多层频率选择表面的结构,设计了 2 种多频带、宽入射角线到圆极化转换超表面,当入射角从 23°~48°变化时,其 3 dB 轴比相对带宽在 2 GHz,5.5 GHz 和 8 GHz 处分别为 17.8%,10%和 22.5%。文献^[20]基于可重构的思想,通过调整变容二极管的容值,实现了在 7~13 GHz 范围内线到圆极化转换的连续可调。文献^[21]提出了一种单层方形开口谐振环的超宽带线到圆极化转换超表面,其 3 dB 轴比带宽为 0.60~1.41 THz,相对带宽达到 80%,转换效率高于 88%。因此,宽带工作,高转化率,宽入射角,低剖面以及小型化越来越成为反射型线到圆极化转换超表面的研究热点和发展趋势。

本文提出了一种反射型超宽带极化变换超表面,该极化变换超表面在 6.40~15.40 GHz、17.49~18.14 GHz 频带内能将线极化入射波转换为轴比小于 3 dB 的圆极化反射波,其连续的 3 dB 轴比的相对带宽高达 82.57%;在 15.81~17.26 GHz 频带内能将线极化入射波转换为极化转化率(Polarization Conversion Ratio, PCR)大于 80%的交叉线极化反射波。

其单元结构尺寸低于 $\lambda/6$,电磁波经过极化转换超表面反射后其能量损耗几乎为零,具有频带宽、单元尺寸小、能量损耗低等优点。该极化变换超表面在电磁波极化特性调控、宽频带天线小型化设计、圆极化天线反射阵面设计等方面具有一定的应用价值。

1 单元结构与仿真结果

极化是表示电磁波的电场矢量按某一规律振动的现象。若在空间某一固定点,观察电磁波电场矢量端点在 1 个时间周期里描绘出的运动轨迹为一个圆,那么就称之为圆极化波。由电磁场基本理论可知,圆极化波产生的条件是:电磁波在任意两正交方向上分解成 2 个正交的线极化波,2 个正交方向上的线极化波幅度相同,相位相差 90°。

在直角坐标系下,平面波以 x 极化沿 $-z$ 轴入射时场的表达式为:

$$\mathbf{E}_i(\mathbf{r}, t) = \text{Re}[(\mathbf{u}_x a_{ix} e^{j\delta_{ix}}) \cdot e^{j(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda} u_z r)}] \quad (1)$$

其反射波场的表达式为:

$$\mathbf{E}_r(\mathbf{r}, t) = \text{Re}[(\mathbf{u}_x a_{rx} e^{j\delta_{rx}} + \mathbf{u}_y a_{ry} e^{j\delta_{ry}}) e^{j(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} u_z r)}] \quad (2)$$

式中: a_{ix} 和 δ_{ix} 分别为入射波电场幅度和相位; a_{rx} 和 a_{ry} 为反射波电场在 x 和 y 方向上的幅度,相位分别为 δ_{rx} 和 δ_{ry} 。定义反射波相位差 $\Delta\delta = \delta_{ry} - \delta_{rx}$ 。

当 $a_{rx} = a_{ry}$ 且 $\Delta\delta = \pi/2 + 2k\pi$ (k 为整数)时,反射电磁波为左旋圆极化波;当 $a_{rx} = a_{ry}$ 且 $\Delta\delta = -\pi/2 + 2k\pi$ (k 为整数)时,反射电磁波为右旋圆极化波。

所设计的极化转换超表面结构见图 1,厚度 $h = 4$ mm 的介质板上表面刻蚀“H”形金属贴片,下表面为完整的金属层。在设计频段内,当 x 或 y 极化波入射时,反射波为圆极化波。

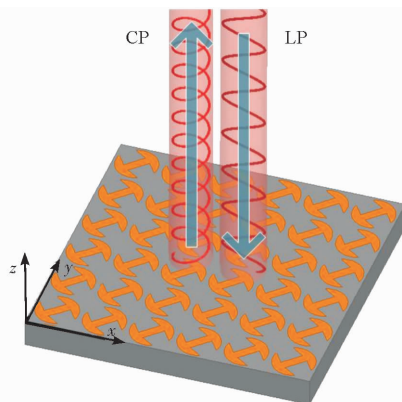


图 1 极化转换超表面结构图

Fig. 1 Structure diagram of the proposed polarization converter

极化转换超表面单元结构参数见图 2,单元周期 $p = 6.75$ mm,圆环半径 $R = 3$ mm,圆环张角 $\alpha =$

130°, 贴片与 x 轴夹角 $\beta = 45^\circ$, 线宽 $w = 1.22$ mm。介质板材料采用介电常数为 2.65, 电损耗角正切为 0.001 的聚四氟乙烯玻璃布板。金属材料为铜, 其电导率为 5.8×10^7 S/m, 厚度为 0.036 mm。

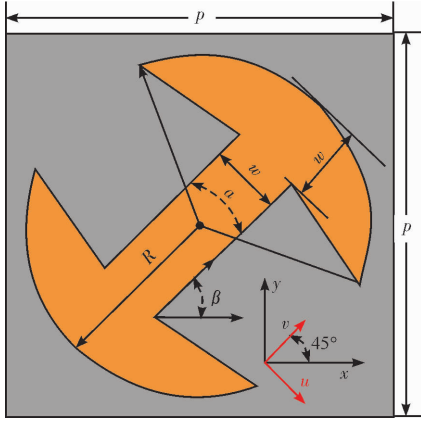


图2 极化转换超表面单元尺寸

Fig. 2 Schematic of the unit cell of the proposed polarizer

定义反射系数 $R_{yx} = a_{ry} / a_{ix}$, $R_{xx} = a_{rx} / a_{ix}$ 分别表示 x 极化到 y 极化, x 极化到 x 极化的反射系数。利用 HFSS 软件, 在 x, y 方向设置主从边界对该结构进行周期单元仿真, x, y 方向设置主从边界模拟无限大周期结构, 电磁波沿 $-z$ 轴方向传播。 x 极化波入射时, 反射系数曲线见图 3。在 6.40~15.40 GHz 频带内, x 极化与 y 极化反射系数曲线相差不大, 并且在 6.86 GHz、9.38 GHz、14.66 GHz 处完全相等。此外, 若定义 $PCR = R_{yx}^2 / (R_{yx}^2 + R_{xx}^2)$ 为极化转化率, 则该结构在 15.81~17.26 GHz 频带内能将大部分 x 极化入射波转换为 y 极化反射波, 且极化转化率大于 80%。

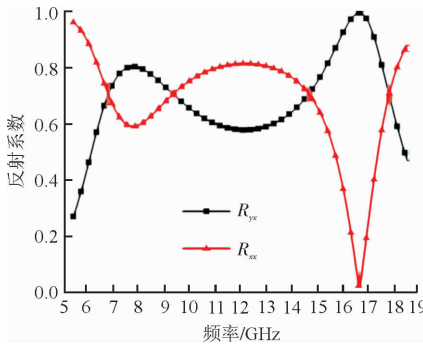


图3 反射系数曲线

Fig. 3 Cures of the reflection coefficients

反射波相位及相位差曲线见图 4, 反射波相位在 6.00~16.62 GHz 内可以稳定地保持在 -91° 附近, 在 16.62~18.50 GHz 范围内保持在 -269° 附近, 因此可以认为当 x 极化波入射时, 该结构能产生圆极化波主要取决于反射系数曲线。这种宽频带相位差稳定特性, 为该结构能在较宽频带内工作奠定了基础。

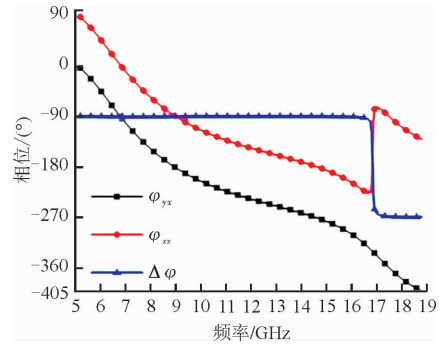


图4 相位及相位差曲线

Fig. 4 Cures of the phase and the phase difference

为了更好地描述反射波的极化特性, 将式(2)的反射场表达式分解为各个分量瞬时值:

$$\begin{cases} E_{rx} = a_{rx} \cos(\phi + \delta_{rx}) \\ E_{ry} = a_{ry} \cos(\phi + \delta_{ry}) \\ E_{rz} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\phi = \omega t - kz$ 。不难看出式(3)为 1 组椭圆的参数方程, 可化为椭圆方程的一般形式:

$$\begin{aligned} & -\left(\frac{E_{rx}}{a_{rx} \sin \Delta \delta}\right)^2 - \left(\frac{E_{ry}}{a_{ry} \sin \Delta \delta}\right)^2 + \\ & \frac{2E_{rx}E_{ry} \cos \Delta \delta}{a_{rx}a_{ry} \sin^2 \Delta \delta} + 1 = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

根据椭圆的一般方程可以求解其长轴 a 与短轴 b ; 椭圆的几何中心; 取向角 ψ (椭圆长轴与 x 轴的夹角); 椭圆角 χ 以及轴比 (Axis Ratio, AR):

$$\tan 2\psi = \frac{2a_{rx}a_{ry}}{a_{rx}^2 - a_{ry}^2} \cos \Delta \delta, \quad (0 \leq \psi \leq \pi) \quad (5)$$

$$\sin 2\chi = \frac{2a_{rx}a_{ry}}{a_{rx}^2 + a_{ry}^2} \sin \Delta \delta \quad (6)$$

$$\chi = \arctan(b/a), \quad (-\pi/4 \leq \chi \leq \pi/4) \quad (7)$$

$$AR = |20 \lg(b/a)| = |20 \lg \tan \chi| \quad (8)$$

根据反射系数的定义可以将式(6)~(8)化为:

$$\chi = 0.5 \arcsin\left(\frac{2r_{xx}r_{yy}}{r_{xx}^2 + r_{yy}^2} \sin \Delta \delta\right) \quad (9)$$

$$AR = \left| 20 \lg \tan \left[0.5 \arcsin\left(\frac{2r_{xx}r_{yy}}{r_{xx}^2 + r_{yy}^2} \sin \Delta \delta\right) \right] \right| \quad (10)$$

其中 χ 是衡量电磁波极化特性的重要参数, 当 $0 < \chi \leq \pi/4$ 时, 为左旋极化波; 当 $-\pi/4 \leq \chi < 0$ 时, 为右旋极化波, 其绝对值越接近 $\pi/4$, 轴比越接近 0, 说明波越接近完美的圆极化波。而在实际工程中定义: 当轴比小于等于 3 dB 时, 认为波为圆极化波。

图 5、图 6 分别给出了反射波椭圆角、轴比随频率变化曲线, 可以看出当入射波为 x 极化波时, 反射波在 6.40~15.40 GHz 范围内为右旋圆极化波; 在 17.49~18.14 GHz 频带内为左旋圆极化波, 轴比均小于 3 dB。并且在 6.85 GHz、9.40 GHz、14.65 GHz 和 17.80 GHz 4 个谐振点处轴比近似为 0, 说明在这

4个频点上反射波为标准的圆极化波。本文仿真分析均考虑入射波为 x 极化波的情况,若入射波为 y 极化波,反射波轴比曲线仍不变;反射波相位差与 x 极化波入射时相差 180° ,因此反射波的旋向与 x 极化波入射时相反,这里不再赘述。

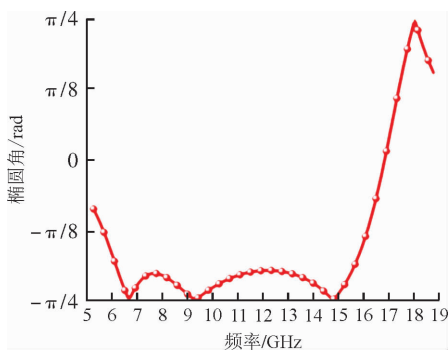


图5 反射波椭圆角

Fig. 5 The elliptical angle of reflected wave

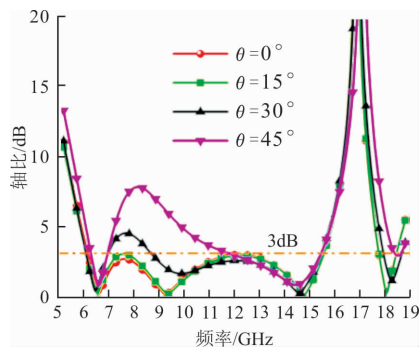


图6 不同入射角的反射波轴比

Fig. 6 Simulated axis ratio of reflected wave with the different incident angle

改变入射角 θ 的大小,使入射波与 z 轴夹角从 0° 到 45° 以 15° 间隔递增。斜入射仿真结果如图6所示,当 $\theta \leq 15^\circ$ 时,反射波3 dB轴比带宽为6.40~15.40 GHz和17.55~18.23 GHz,基本保持不变,而当 $\theta > 15^\circ$ 时,宽带轴比曲线逐渐被分成3个窄带部分;当 $\theta = 30^\circ$ 时,3 dB轴比带宽为6.36~7.2 GHz、8.86~15.30 GHz和17.67~18.36 GHz略向低频偏移并有展宽的趋势,仍可以在较宽的频带内工作;当 $\theta = 45^\circ$ 时,轴比曲线的低频部分变化明显,3 dB轴比带宽为6.55~7.16 GHz、11.9~15.27 GHz和18.12~18.30 GHz。

随着入射角逐渐增大,反射波轴比曲线在6.85 GHz、14.65 GHz和17.80 GHz 3个谐振点处较为稳定,说明该极化变换器在6.85 GHz、14.65 GHz和17.80 GHz 3个谐振点处工作时对入射角不敏感。

2 原理分析

将 x 、 y 轴顺时针旋转 45° ,得到 u 、 v 轴,见图2。

此时, x 极化入射波可以分解为 u 、 v 方向上等幅同相的线极化波入射波。设 $R_{uu} = a_{ru}/a_{iu}$, $R_{vu} = a_{rv}/a_{iu}$, $R_{uv} = a_{ru}/a_{iv}$, $R_{vv} = a_{rv}/a_{iv}$ 分别为 u 极化到 u 极化, u 极化到 v 极化, v 极化到 u 极化, v 极化到 v 极化的反射系数。其仿真结果见图7。

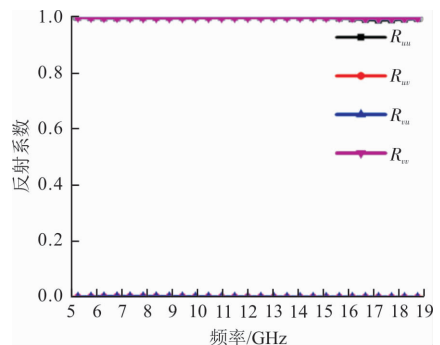


图7 在 u - v 坐标系下反射系数

Fig. 7 Magnitudes of the reflection coefficients in the u - v coordinate system

可以看出 $R_{uu} = R_{vv} \approx 1$, $R_{uv} = R_{vu} \approx 0$,说明当 u 极化波与 v 极化波入射时,反射波全部为同极化波,并且电磁波几乎被完全反射,说明电磁波能量在极化转换过程中几乎没有损耗。

由于入射的 u 、 v 极化波是等幅同相的线极化波,因此 $a_{ru} = a_{rv}$ 。又因为 u 、 v 是正交的,因此代入到式(6)中可得:

$$\sin^2 \chi = \frac{2a_{ru}a_{rv}}{a_{ru}^2 + a_{rv}^2} \sin \Delta \delta_{ru} = \sin \Delta \delta_{uv} \quad (11)$$

式中: $\Delta \delta_{uv}$ 是 u 极化与 v 极化反射波的相位差,把式(11)代入式(8)中可得到轴比与相位差的关系式:

$$AR = |20 \lg(b/a)| = |20 \lg \tan(0.5 \Delta \delta_{uv})| \quad (12)$$

将3 dB轴比代入到式(12)中可得:若要反射波为圆极化波,则需轴比小于等于3 dB,也就是需要 $\Delta \delta_{uv} \in [71^\circ + 180^\circ k, 109^\circ + 180^\circ k]$,(k 为整数)。当 k 为偶数时,满足上式的反射波为右旋圆极化波;当 k 为奇数时,满足上式的反射波为左旋圆极化波。图8为相位差 $\Delta \delta_{uv}$ 随频率变化曲线,可以得出反射波在6.40~15.40 GHz范围内为右旋圆极化波;在17.49~18.14 GHz频带内为左旋圆极化波,这与前文给出的结果一致。

在 u - v 坐标系下,极化转换特性可以根据上、下表面电流分布情况来进一步解释。图9给出了 u 、 v 极化波入射时,在6.85 GHz、9.40 GHz、14.65 GHz和17.80 GHz频点处的上、下表面电流分布情况。其中,前2列依次分别表示 u 极化波入射时,上、下表面电流分布情况;后2列依次表示 v 极化波入射时,上、下表面电流分布情况。第1~4行依次表示在6.85 GHz、9.40 GHz、14.65 GHz和17.80 GHz频点的上、下表面电流分布情况。在6.85 GHz与9.40 GHz 2个谐振点处,无论入射波是 u 极化波还

是 v 极化波,上、下表面电流方向均反向(见图9(a)~(h)),因此在这2个频点处均产生了磁谐振。在14.65 GHz和17.80 GHz 2个谐振点处,当 u 极化波入射时,上、下表面电流方向均相反(见图9(i)、(j)、(m)、(n)),产生磁谐振; v 极化波入射时,上、下表面电流方向均相同(见图9(k)、(l)、(o)、(p)),产生电谐振。由于在各个谐振点处均出现了良好的谐振现象,说明了该结构具有超宽带工作的特性。

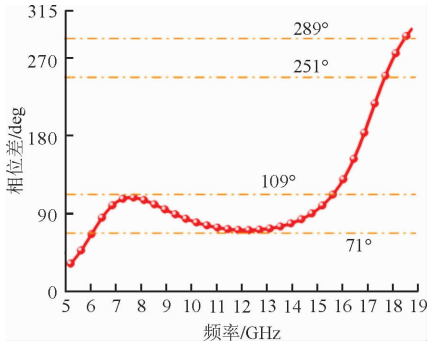


图8 在 uv 坐标系下反射系数相位差

Fig. 8 Phase differences of the reflection coefficients in the uv coordinate system

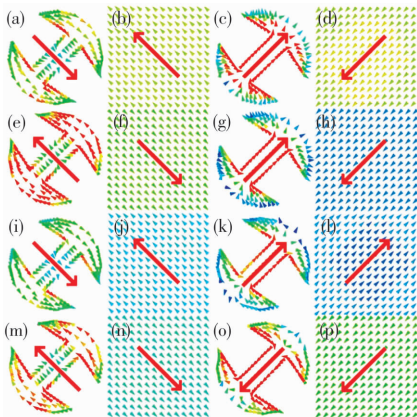


图9 不同谐振点处 u 、 v 极化波入射时上、下表面电流分布

Fig. 9 Surface current distributions on the top and the bottom for incident u -polarized and v -polarized waves in different resonance point

3 样品加工及测试

为了验证仿真结果,采用印刷电路板的方法对极化转换超表面进行加工。加工样品由2304(48×48)个单元组成,整体结构尺寸为324 mm×324 mm。上层刻蚀“H”形金属贴片,中间是介电常数为2.65损耗为0.001的聚四氟乙烯玻璃布板,介质厚度为4 mm,底层为金属底板。

测试环境见图10,2个喇叭天线均连接矢量网络分析仪,左侧喇叭天线发射 x 极化波,右侧喇叭天线分别以 x 、 y 方向接收从极化转换超表面反射回来的反射波。为了得到反射系数相对值,需利用

等大的金属板测试 x 极化波发射,同极化接收的反射系数。多次测量取均值并做差后可以得到更准确的反射系数结果。将数据代入式(10)中可以得到如图11所示的轴比曲线。

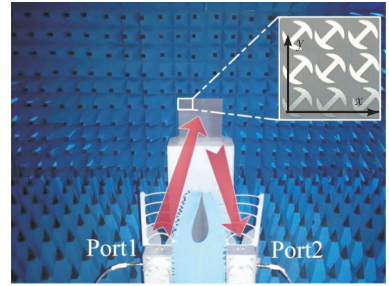


图10 极化转换超表面性能测试

Fig. 10 Measurement of the proposed polarization converter

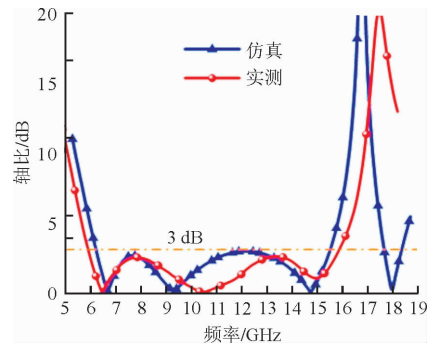


图11 仿真与实测轴比

Fig. 11 Simulated and measured axis ratio of reflected wave

从图中可以看出,实测轴比曲线略好于仿真结果,其3 dB轴比带宽为6.12~15.73 GHz,相对带宽为87.96%。由于测试环境限制,未对18 GHz以上的高频窄带部分进行测试,但从曲线趋势上看将会在接下来的一段频带内继续产生圆极化波。由于测试样品的有限尺寸与无限大周期仿真结果存在差异;测试喇叭天线摆放实际为斜入射;加工精度误差、仪器仪表误差等,均导致实测与仿真存在一定差异。

4 结论

本文基于人工电磁表面提出了一种单层反射型超宽带极化变换超表面,该超表面由周期排列的“H”形金属结构,介质板和金属底板构成,在6.40~15.40 GHz、17.49~18.14 GHz频带内能将线极化入射波转换为轴比小于3 dB的圆极化反射波,其连续的3 dB轴比的相对带宽高达82.57%;在14.36~15.61 GHz频带内能将线极化入射波转换为极化转化率大于80%的交叉线极化反射波。在 uv 坐标系下分析了表面电流分布,解释了其超宽带工作的原理。实测结果略好于仿真,验证了其超宽带工作特性。该极化变换超表面在电磁波极化特性调控、宽频带天线小型化设计、圆极化天线反射阵面设计等方面具有一定的应用价值。

参考文献(References):

- [1] 林昌禄,宋锡明. 圆极化天线[M]. 北京:人民邮电出版社,1986.
LIN C L, SONG X M. Circular Polarized Antenna [M]. Beijing: People's Post and Telecommunications Press, 1986. (in Chinese)
- [2] ENGHETA N, ZIOLKOWSKI R W. Metamaterials-Physics and Engineering Explorations [M]. [S. l.]: Wiley, 2006.
- [3] LI D, LI T W, HAO R, et al. A Low-Profile Broadband Bandpass Frequency Selective Surface with Two Rapid Band Edges for 5G Near-Field Applications [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(2):670-676.
- [4] GHOSH S, SRIVASTAVA K V. An Angularly Stable Dual-Band FSS with Closely Spaced Resonances Using Miniaturized Unit Cell[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2017, 27(3):218-220.
- [5] LI S J, CAO X Y, GAO J, et al. Analysis and Design of Three Layers Perfect Metamaterial-inspired Absorber Based on Double Split-Serration-Rings Structure[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2015, 63(11): 5155-5160.
- [6] LI S J, CAO X Y, GAO J, et al. Broadband and Multi-band Polarization-insensitive Perfect Absorber Devices Based on a Tunable and Thin Double Split-Ring Metamaterial[J]. Optics Express. 2015, 23(3):3523-3533.
- [7] 龚琦,张帅,龚书喜,等. 利用高阻抗表面减缩天线雷达散射截面的新方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(3):134-140.
GONG Q, ZHANG S, GONG S X, et al. Application of the High Impedance Surface for RCS Reduction of the Antenna[J]. Journal of Xidian University, 2012, 39(3):134-140. (in Chinese)
- [8] LI S J, CAO X Y, GAO J, et al. Hybrid Metamaterial Device with Wideband Absorption and Multiband Transmission Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons and Perfect Absorber[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(18):181103.
- [9] 郑月军,高军,曹祥玉,等. 覆盖 X 和 Ku 波段的低雷达散射截面人工磁导体反射屏[J]. 物理学报, 2015, 64(2):024219.
ZHENG Y J, GAO J, CAO X Y, et al. A Low Radar Cross-Section Artificial Magnetic Conductor Reflection Rscreen Covering X and Ku Band[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(2):024219. (in Chinese)
- [10] 韩彤,曹祥玉,高军,等. 共享孔径超表面设计及其在提升波导缝隙天线辐射和散射性能中的应用[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(3): 31-37.
HAN T, CAO X Y, GAO J, et al. A Design of Shared Aperture Metasurface and Its Application on Improving Radiation and Scattering Performance at the Waveguide Slot Antenna[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(3):31-37. (in Chinese)
- [11] 韩江枫,曹祥玉,高军,等. 一种基于超材料的宽带、反射型 90°极化旋转体设计[J]. 物理学报, 2016, 65(4): 044201.
HAN J F, CAO X Y, GAO J, et al. Design of Broadband Reflective 90° Polarization Rotator Based on Metamaterial [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65 (4): 044201. (in Chinese)
- [12] SU P, ZHAO Y, JIA S, et al. An Ultra-Wideband and Polarization-Independent Metasurface for RCS Reduction[J]. Scientific Reports, 2016, 6:20387.
- [13] KONG C, LI Z, WU Z. Ultra-Wideband Polarization Conversion Metasurface[C]// International Symposium on Antennas, Propagation and Em Theory. IEEE, 2017:210-212.
- [14] SUI S, MA H, WANG J, et al. Symmetry-based Coding Method and Synthesis Topology Optimization Design of Ultra-wideband Polarization Conversion Metasurfaces [J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(1):063908.
- [15] GHAZIZADEH M H, DADASHZADEH G, Korshidi M. A Novel Wideband Electromagnetic Band Gap Structure for Circular Polarization Conversion[C]// International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics. IEEE, 2012:1-4.
- [16] DOUMANIS E, GOUSSETIS G, GOMEZ-TORNERO J L, et al. Anisotropic Impedance Surfaces for Linear to Circular Polarization Conversion[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2012, 60 (1):212-219.
- [17] PU M, CHEN P, WANG Y, et al. Anisotropic Meta-Mirror for Achromatic Electromagnetic Polarization Manipulation [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(13):107.
- [18] 庄亚强,王光明,张小宽,等. 基于梯度超表面的反射型线-圆极化转换器设计[J]. 物理学报, 2016, 65 (15):154102.
ZHUANG Y Q, WANG G M, ZHANG X K, et al. Design of Reflective Linear-Circular Polarization Converter Based on Phase Gradient Metasurface[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(15):154102. (in Chinese)
- [19] FARTOOKZADEH M. Multi-Band Metamirrors for Linear to Circular Polarization Conversion with Wideband and Wide-Angle Performances [J]. Applied Physics B, 2017, 123(4):115.
- [20] BADREDDINE R, ANDRÉ L, et al. Electronic Control of Linear-to-Circular Polarization Conversion Using a Reconfigurable Metasurface[J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(21): 214101.
- [21] JIANG Y, WANG L, WANG J, et al. Ultra-Wideband High-Efficiency Reflective Linear-to-Circular Polarization Converter Based on Metasurface at Terahertz Frequencies [J]. Optics Express, 2017, 25 (22):27616.