

基于单层线-圆极化转换聚焦超表面的宽带高增益圆极化天线设计

李唐景 梁建刚 李海鹏 牛雪彬 刘亚娇

Broadband circularly polarized high-gain antenna design based on linear-to-circular polarization conversion focusing metasurface

Li Tang-Jing Liang Jian-Gang Li Hai-Peng Niu Xue-Bin Liu Ya-Qiao

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 064102 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.064102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.064102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光子晶体传输特性的时域精细积分法分析

[Analysis of photonic crystal transmission properties by the precise integration time domain](#)

物理学报.2017, 66(8): 084101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.084101>

基于多重查找表的太赫兹波段卷云微物理参数的反演方法

[Retrieval method of cirrus microphysical parameters at terahertz wave based on multiple lookup tables](#)

物理学报.2017, 66(5): 054102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.054102>

基于光栅结构的远场时间反演亚波长源成像

[Far-field time reversal subwavelength imaging of sources based on grating structure](#)

物理学报.2017, 66(4): 044101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.044101>

插值小波尺度法探地雷达数值模拟及四阶 Runge Kutta 辅助微分方程吸收边界条件

[Ground penetrating radar numerical simulation with interpolating wavelet scales method and research on fourth-order Runge-Kutta auxiliary differential equation perfectly matched layer](#)

物理学报.2016, 65(23): 234102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.234102>

大地土壤表面与浅埋多目标宽带复合电磁散射研究

[Wide-band composite electromagnetic scattering from the earth soil surface and multiple targets shallowly buried](#)

物理学报.2016, 65(20): 204101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204101>

基于单层线-圆极化转换聚焦超表面的宽带高增益圆极化天线设计*

李唐景[†] 梁建刚 李海鹏 牛雪彬 刘亚峤

(空军工程大学防空反导学院, 西安 710051)

(2016年4月21日收到; 2016年11月29日收到修改稿)

基于线-圆极化转换原理和聚焦超表面相关理论, 设计了一种反射型宽带线-圆极化转换聚焦超表面, 并结合线极化馈源设计了宽带的高增益圆极化天线. 首先, 提出了一种单层的变形十字超表面单元, 单元具有极化独立特性, 并且能够在10—14 GHz宽频带范围实现对反射波相位 360° 范围全调控, 同时利用该单元构建的一维超单元很好地验证了奇异反射现象. 然后, 分别控制单元横向和纵向尺寸的分布构建出同时满足线-圆极化转换和聚焦条件的双功能超表面. 最后, 采用Vivaldi天线作为馈源对超表面进行照射组成天线系统, 仿真及测试结果均表明天线系统同时实现了高增益和线-圆极化转换, 系统的 -1 dB带宽为24%, -3 dB轴比带宽为29.8%. 本文的设计充分体现了超表面对电磁波相位和极化操控的灵活性, 具有显著的应用前景.

关键词: 超表面, 线-圆极化转换, 聚焦, 宽带

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Ja, 78.47.dc, 71.20.-b

DOI: 10.7498/aps.66.064102

1 引言

超表面^[1-3]是基于相位突变和极化控制思想设计的一种新型二维人工超材料, 因其具有强大的电磁波操控能力, 并且相对于传统的超材料具有低损耗、低剖面、易加工等优势, 自提出以来就备受关注, 相关的研究成果也颇为丰硕.

在相位调控方面, 2011年哈佛大学Capasso课题组^[4]将不同的超材料单元按照特定的顺序排布在二维平面上, 产生相位梯度, 从而在分界面上引入不同的相位突变, 从而实现对电磁波反射/折射相位的灵活调控, 实现了奇异反射和奇异折射等功能, 并由此推导出了广义菲涅耳定律. 2012年, 复旦大学Sun等^[5]利用H型单元设计的渐变折射率链接超表面将入射波转变为表面波, 效率接近100%, 在隐身和吸波等方面具有广泛的应用前景, 同年, 他们利用H型单元设计了高效的反射聚焦超

表面^[6]. 2014年, 美国德克萨斯州大学Estakhri和Alù^[7]设计的纳米级反射超表面可在宽带范围内对光波进行高效操控, 分别实现了屈光、波束操控和聚焦.

在极化转换方面, 2012年美国哈佛大学Yu等^[8]利用V形纳米天线设计的超表面在光学频段实现了线-圆极化转换; 2013年香港大学Zhu等^[9]利用 4×4 个单元构成的线-圆极化转换超表面将线极化贴片天线和缝隙天线的辐射形式变为圆极化, 并且性能得到了一定提升; 2014年东南大学Ma等^[10]利用两个正交的I型单元构建了双折射各向异性超表面, 在微波频段分别实现了线-圆极化转换和线极化的交叉极化转换; 2015年空军工程大学屈绍波团队设计的透射型极化转换超表面实现了超宽带的线-圆极化转换, 其中在11—18.3 GHz范围内转换效率超过了90%^[11], 同年, 该团队利用非对称的双开口谐振环单元构建的极化转换超表面在宽带范围内实现了线极化的交叉极化转换^[12].

* 国家自然科学基金(批准号: 61372034)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: litangjing666@sina.com

上述两种类型的超表面只具有单一的功能,若利用同一种单元将两种功能结合起来,经过合理的设计即可得到双功能超表面.

本文结合线-圆极化转换原理和聚焦超表面相关理论,提出了一种单层的变形十字超表面单元,其具有很好的极化独立性并且通过改变结构尺寸可以实现对反射波相位调控范围覆盖 360° ,同时在 $10\text{--}14\text{ GHz}$ 范围内平滑的相位曲线保证了单元能够在宽带工作.首先在中心频率 12 GHz 处选取相位间隔为 60° 的六个单元构成超单元,对于 x 极化和 y 极化入射波具有相反的相位梯度,由仿真结果可以看出垂直入射的 x 极化波经超单元反射后向正 x 方向偏折,垂直入射的 y 极化波经超单元反射后向负 x 方向偏折,且偏折角与理论计算值保持一致;然后分别控制单元横向和纵向尺寸的分布设计了既可以实现线-圆极化转换又可以实现聚焦的单层超表面,仿真时分别用 y 极化平面波和 x 极化平面波垂直照射到超表面,由结果可以看出两种极化方式的平面波在 $10\text{--}14\text{ GHz}$ 范围内聚焦效果明显,并且焦距与设计值相符.传统上在设计极化独立的单元时,为了增加相位覆盖范围和展宽带宽一般采用多层堆叠技术^[13,14],本文这种单层的设计大大降低了加工难度与成本,具有明显的优势.为了进一步将该超表面应用到工程当中^[15-17],根据光路可逆原理,将线极化馈源 Vivaldi 天线的相位中心置于焦点处,并使其极化方向与 x 轴夹角呈 45° ,设计了宽带的高增益右旋圆极化天线.为了验证天线系统的性能,我们加工了样品并进行了测试,测试结果与仿真结果符合较好,表明系统的 -1 dB 增益带宽为 24% ($11\text{--}14\text{ GHz}$), 3 dB 轴比带宽为 29.8% ($10\text{--}13.5\text{ GHz}$),其中在 12 GHz 处增益为 19.6 dBic ,口径效率达到了 54.8% .

2 宽带线-圆极化转换聚焦超表面设计

2.1 理论分析

首先简要分析线极化波转换为圆极化波需要满足的条件^[18].由电磁场基本理论可知,圆极化波可以分解为两个相互正交、幅值相等且相位相差 90° 的线极化波,那么实现线-圆极化转换就要满足两个条件.首先,将线极化波分解为两个相互正交且幅值相等的线极化波;其次,这两个线极化波相

位相差 90° .本文采用反射型单元实现线-圆极化转换,如图 1 所示,线极化波沿负 z 方向入射,其极化方向与 x 轴夹角为 θ .当 $\theta = 45^\circ$ 或 $\theta = 135^\circ$ 时入射的线极化波恰好可以分解为两个正交的且幅值相等的线极化分量,我们以 $\theta = 45^\circ$ 的情况为例进行分析,此时入射波的电场可以表示为

$$\mathbf{E}_i = \frac{\sqrt{2}}{2} (\hat{e}_x, \hat{e}_y) \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

单元的反射系数矩阵可以表示为 $\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{xx} & r_{yx} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{pmatrix}$,其中 r_{ij} 代表 i 极化波入射条件下反射波为 j 极化波时的反射系数.假设单元没有交叉极化,即 $r_{xy} = r_{yx} = 0$,此时单元的反射系数矩阵为 $\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{xx} & 0 \\ 0 & r_{yy} \end{pmatrix}$.

1) 若 $\phi_x - \phi_y = 90^\circ$,其中 ϕ_x 和 ϕ_y 分别为单元在 x 和 y 方向的反射相位,此时单元的反射系数矩阵可以表示为 $\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -j \end{pmatrix}$,由 (1) 式可以得到反射波的电场为

$$\mathbf{E}_r = \frac{\sqrt{2}}{2} (\hat{e}_x, \hat{e}_y) \begin{pmatrix} 1 \\ -j \end{pmatrix}, \quad (2)$$

可以判断反射波为右旋圆极化波,即单元实现了线极化波到右旋圆极化波的转换.

2) 若 $\phi_x - \phi_y = -90^\circ$,此时单元的反射系数矩阵可以表示为 $\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & j \end{pmatrix}$,反射波的电场可以表示为

$$\mathbf{E}_r = \frac{\sqrt{2}}{2} (\hat{e}_x, \hat{e}_y) \begin{pmatrix} 1 \\ j \end{pmatrix}, \quad (3)$$

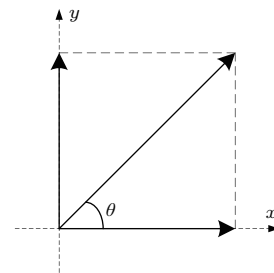


图 1 线-圆极化转换示意图

Fig. 1. Schematic view of the linear-to-circular polarization conversion.

可以判断反射波为左旋圆极化波, 即单元实现了线极化波到左旋圆极化波的转换.

设计聚焦超表面时, 单元对反射相位的调控范围需要覆盖 360° , 并且在二维平面内相位补偿要满足双曲面分布 [19], 通常采用改变单元的尺寸来调控相位. 为了方便地在一种超表面上集成极化转换和聚焦两种功能, 我们需要设计出能够独立操控 x 极化和 y 极化入射波的超表面单元. 具体而言, 改变单元一个方向的尺寸仅影响与该方向平行的入射波的反射相位, 对极化与之正交的入射波的反射相位不产生影响.

2.2 单元设计

根据上述设计原理, 本文提出了一种中心频率在 12 GHz 处的变形十字超表面单元, 其结构如图 2 所示. 介质基板采用相对介电常数为 4.3, 损耗角正切值为 0.001, 厚度 $h = 3$ mm 的环氧玻璃布板, 背面涂覆金属铜, 正面加载变形十字结构, 其中单元周期 $p = 7$ mm, 金属结构中 $k = 0.2$ mm, a_x 和 a_y 分别为 x 方向和 y 方向金属枝节的长度. 本文利用 CST Microwave Studio 进行仿真分析. 图 3 给出了单元主极化和交叉极化的反射系数幅度, 可以看出在 10—14 GHz 频带范围该单元交叉极化很小且主极化的反射系数幅度接近于 1.

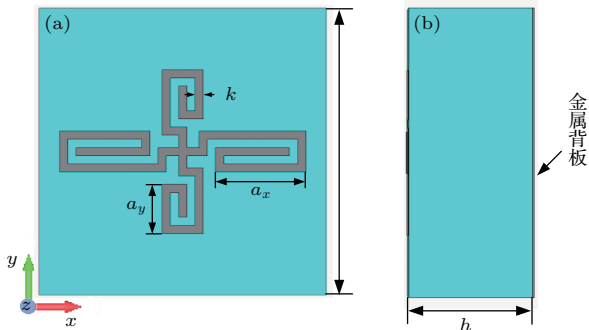


图 2 变形十字单元 (a) 主视图; (b) 侧视图
Fig. 2. Transformation cross element: (a) Top view; (b) perspective view.

单元是旋转对称的, 首先研究一个方向的主极化反射相位. 这里我们固定 a_x 值, 令入射波为 y 极化波, 改变 a_y 值进行仿真, 得到的反射相位曲线如图 4 所示. 由图 4 可以看出在 10—14 GHz 频带范围内通过改变金属枝节长度可以实现反射相位 360° 的覆盖, 并且曲线平滑度较好.

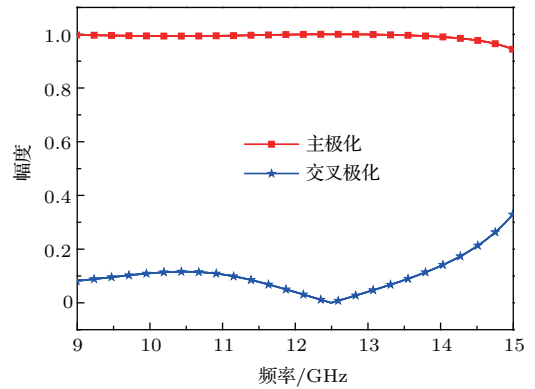


图 3 反射系数幅度

Fig. 3. Amplitudes of reflection coefficient.

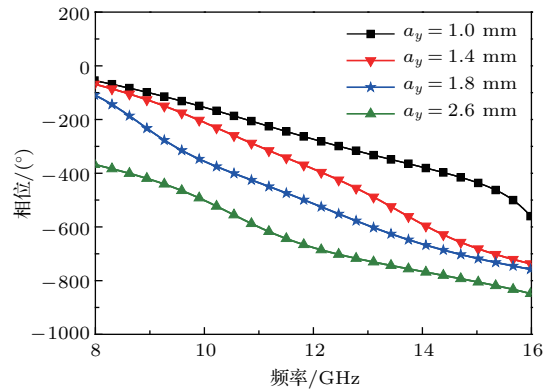


图 4 y 极化波的反射相位

Fig. 4. Reflected phase of y -polarized wave.

下面研究单元的独立性. 选取中心频率 12 GHz, 令入射波为 y 极化波, 仿真结果如图 5 所示. 由图 5 可以看出 a_x 的改变对 y 极化波的反射相位几乎没有影响, 则可以认为单元是独立的, 这样 x 极化和 y 极化的相位就可以独立控制, 降低了下文设计线-圆极化转换聚焦超表面的难度. 由于单元具有对称性和独立性, 只需分析尺寸 a_y 对 y 极化波的影响, a_x 对 x 极化波的影响是相同的. 图 6 给出了不同频率处改变 a_y 时 y 极化波的反射相位曲线, 可以看出相位覆盖 360° 的同时曲线的平滑度很好, 这也是实现宽带的前提.

在下文中存在电磁波对单元斜入射的情况, 这里我们分析了斜入射对单元反射相位的影响. 图 7 为在 12 GHz 处不同入射角时单元所对应的反射相位, 可以看出在入射角 $\beta < 45^\circ$ 范围内反射相位较小的差异是可以接受的, 因此可以忽略斜入射的影响.

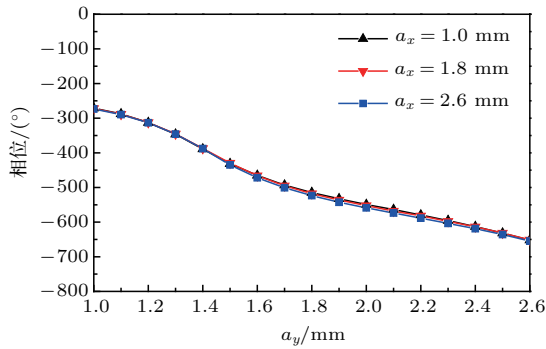


图5 (网刊彩色) 极化独立性研究

Fig. 5. (color online) Research on polarization independence.

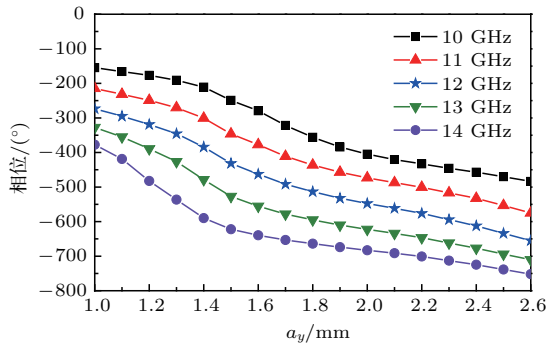

 图6 不同频率处 y 极化波的反射相位

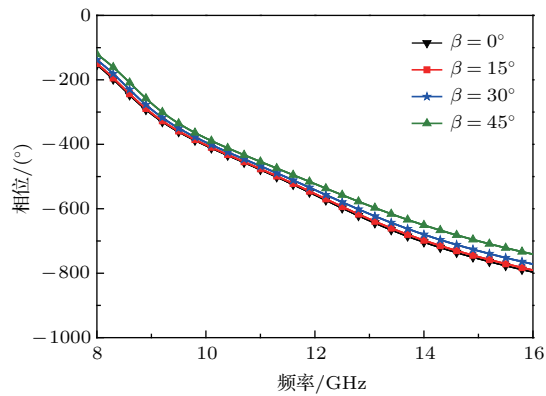
 Fig. 6. Reflected phase of y -polarized wave at different frequencies.


图7 (网刊彩色) 不同入射角时单元的反射相位

Fig. 7. (color online) Reflected phase under different incident angles.

2.3 宽带奇异反射现象验证

为了进一步验证单元的相位调控特性和极化独立特性, 我们设计了一维的超单元来观察奇异偏折现象. 根据广义反射定律^[20]

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

其中 θ_i 和 θ_r 分别为入射角和反射角, λ_0 为真空中波长, n_i 为介质的折射率 (真空中 $n_i = 1$), $d\Phi/dx$ 为相位梯度. 在中心频率 12 GHz 处选取相位间隔为 60° 的六个单元构成超单元, 对于 x 极化入射波, 沿 x 轴正方向相位梯度为 -60° ; 对于 y 极化入射波, 沿 x 轴正方向相位梯度为 60° . 所对应的单元尺寸分别为 $a_{x1} = a_{y6} = 1.26$, $a_{x2} = a_{y5} = 1.42$, $a_{x3} = a_{y4} = 1.58$, $a_{x4} = a_{y3} = 1.8$, $a_{x5} = a_{y2} = 2.18$, $a_{x6} = a_{y1} = 2.5$, 图 8 为所设计超单元的示意图.

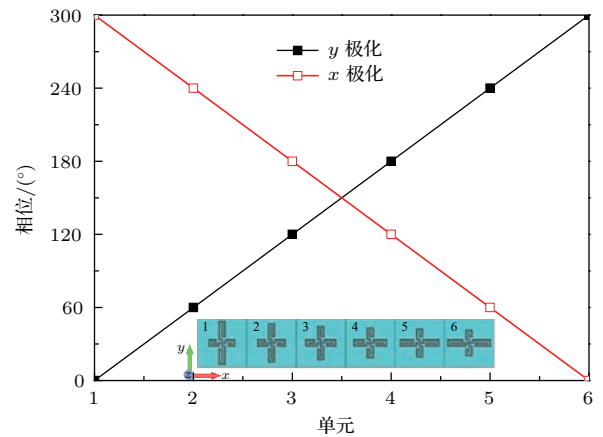


图8 (网刊彩色) 超单元及相位分布

Fig. 8. (color online) Super cell and phase distribution.

分别使 x 极化波和 y 极化波沿负 z 方向入射, 对于所设计的超单元, 由 (4) 式可知垂直入射 x 极化波经过反射后将向 x 轴正方向偏折, 垂直入射 y 极化波经过反射后将向 x 轴负方向偏折, 计算可得在 10, 12 和 14 GHz 处的偏折角分别为 45° , 37° 和 30° . 图 9 为仿真得到的 xoz 面电场分布图, 可以看出明显的奇异偏折现象, 而且偏折的角度与理论计算值相符.

2.4 超表面设计

为了实现线-圆极化转换, 单元的反射相位需要满足 $\phi_x - \phi_y = 90^\circ$ 或 $\phi_x - \phi_y = -90^\circ$, 2.2 节已经验证了单元具有良好的独立性, 因此可以分两步来设计线-圆极化转换聚焦超表面.

$$\phi_y(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_0} (\sqrt{x^2 + y^2 + f^2} - f) + \phi_0, \quad (5)$$

$$\phi_x(x, y) = \phi_y(x, y) + 90^\circ. \quad (6)$$

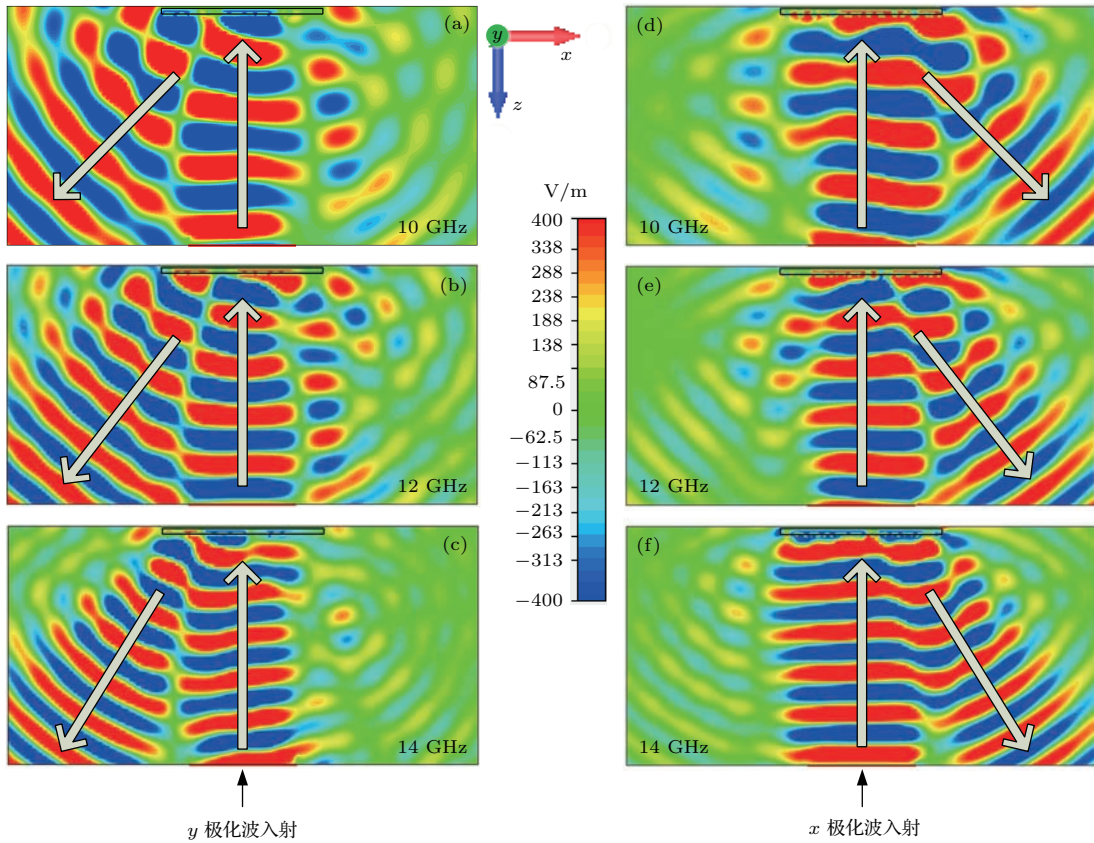


图9 (网刊彩色) xoz 面电场分布图 (a), (b), (c) y 极化平面波入射; (d), (e), (f) x 极化平面波入射

Fig. 9. (color online) The electric field distribution in xoz plane (a), (b), (c) with the incidence of y -polarized plane wave and (d), (e), (f) with the incidence of x -polarized plane wave.

在中心频率 12 GHz 处, 设定焦距比为 0.5, 构建由 13×13 个单元组成的二维聚焦超表面, 其厚度为 3 mm, 面积为 $91 \text{ mm} \times 91 \text{ mm}$. 首先确定对 y 极化波聚焦时单元的相位分布, (5) 式为各位置处单元的相位, 其中 f 为焦距, 令原点处单元的初始相位 $\phi_0 = 0^\circ$, 可计算出各位置处单元的相对相位分布如图 10(a) 所示, 根据相位分布挑选出对应

的 a_y 尺寸; 在确定对 x 极化波聚焦的单元相位分布时, 以 $\phi_x - \phi_y = 90^\circ$ 为例进行设计, 依据 (6) 式计算出各位置处单元的相对相位分布如图 10(b) 所示, 根据相位分布挑选出对应的 a_x 尺寸. 这样就确定了各位置处单元的尺寸, 构建的线-圆极化转换聚焦超表面如图 11 所示.

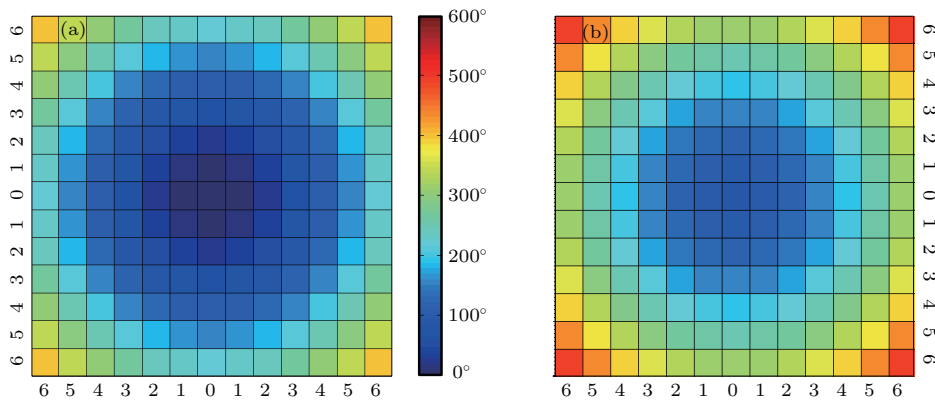


图 10 (网刊彩色) 相对相位分布 (a) y 极化; (b) x 极化

Fig. 10. (color online) Phase distribution: (a) y -polarized; (b) x -polarized.

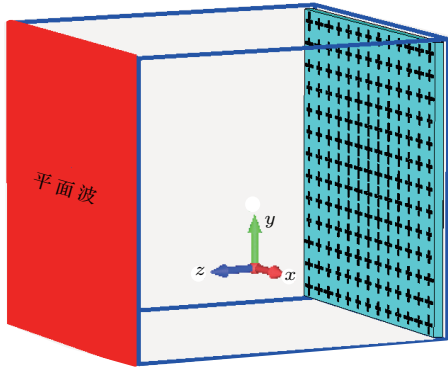


图 11 (网刊彩色) 线-圆极化转换聚焦超表面
Fig. 11. (color online) Linear-to-circular polarization conversion focusing metasurface.

由于单元具有宽带特性, 所构成的聚焦超表面也具有宽带特性, 根据(5)式可知焦距会随频率的增大而增加^[21]. 为了验证所设计聚焦超表面的聚焦效果, 分别用 y 极化平面波和 x 极化平面波沿负 z 方向垂直照射到超表面进行仿真, 结果中 xoz 面的能量分布如图12所示, 可以看出在10—14 GHz 频段范围内两种极化方式的平面波聚焦效果明显. 为了更加精确地得到焦点的位置, 我们利用软件后处理得到了 z 轴上的能量强度, 结果如图13所示, 可以看出焦点的位置与之前设定的焦距大致相等, 不同频率处焦点的位置略有不同, 随着频率的增大焦距增加, 这与之前的推测是一致的.

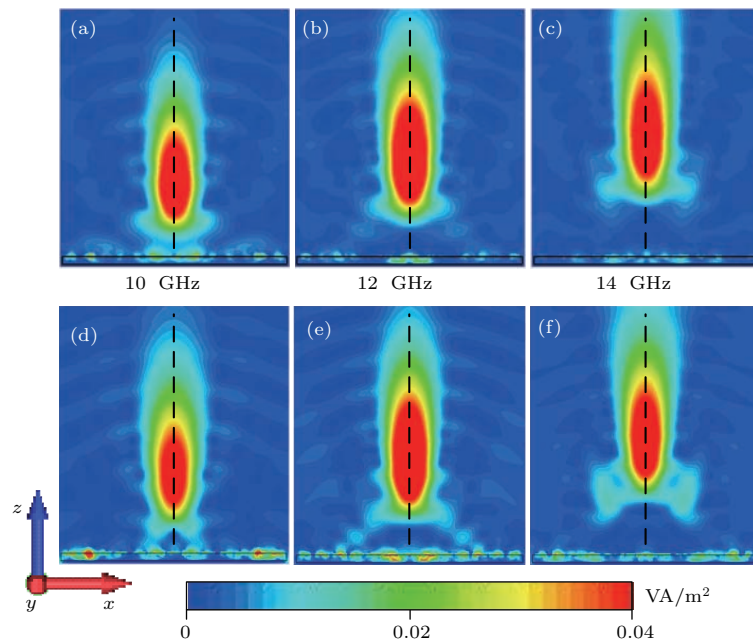


图 12 (网刊彩色) xoz 面能量分布图 (a), (b), (c) y 极化平面波入射; (d), (e), (f) x 极化平面波入射
Fig. 12. (color online) The power-flow distribution in xoz plane (a), (b), (c) with the incidence of y -polarized plane wave and (d), (e), (f) with the incidence of x -polarized plane wave.

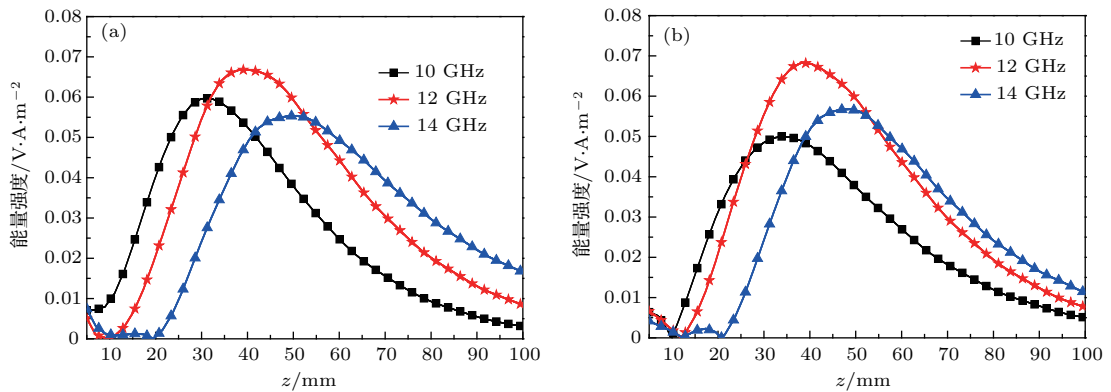


图 13 (网刊彩色) z 轴能量强度 (a) y 极化平面波入射; (b) x 极化平面波入射
Fig. 13. (color online) The power intensity on z axis (a) with the incidence of y -polarized plane wave and (b) with the incidence of x -polarized plane wave.

3 宽带线-圆极化转换聚焦超表面在高增益圆极化天线中的应用

3.1 宽带高增益圆极化天线设计

上一节中我们所设计的聚焦超表面具有理想的聚焦效果, 根据光路可逆原理, 焦点处放置馈源, 其辐射的球面波经过聚焦超表面反射后转变为平

面波, 波束宽度变窄, 馈源增益将有效提高; 由于每个单元的反射相位始终保持 $\phi_x - \phi_y = 90^\circ$, 当线极化馈源的极化方向与 x 轴夹角为 45° 或 135° 时即可实现线-圆极化转换. 为了减小遮挡, 我们利用厚度为 1.5 mm、宽为 16 mm、长为 50 mm 的宽带 Vivaldi 天线作为馈源, 将其相位中心置于焦点处并使其极化方向与 x 轴夹角呈 45° , 设计了宽带的右旋圆极化天线.

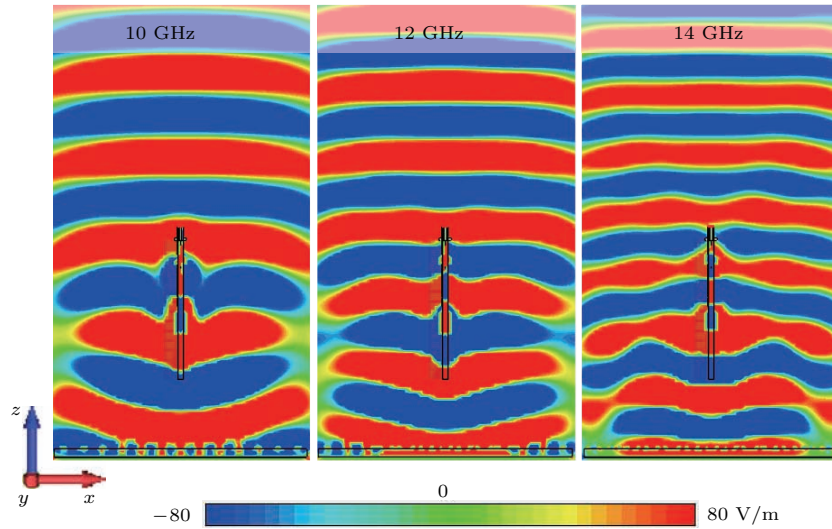


图 14 (网刊彩色) 天线系统 xoz 面近场电场分布图

Fig. 14. (color online) Simulated electric field distribution in xoz plane.

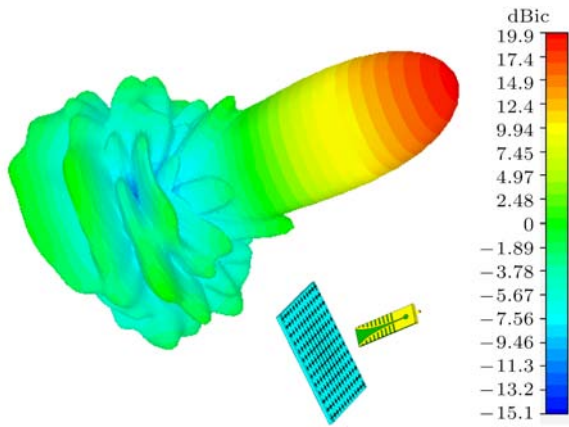


图 15 (网刊彩色) 12.5 GHz 处三维辐射方向图

Fig. 15. (color online) Three-dimensional simulated far field radiation pattern at 12.5 GHz.

图 14 为仿真得到的不同频点处天线系统的 xoz 面近场电场分布图, 可以明显地观察到馈源 Vivaldi 天线辐射出的球面波经聚焦超表面反射后得到了近平面波, 达到了预期效果. 三维辐射方向图如图 15 所示, 天线系统在 12.5 GHz 处增益达到

了 19.9 dBic, 并且轴比为 2.1 dB.

3.2 加工测试

为了验证该天线系统的性能, 我们利用平面印刷电路板技术加工制作了样品并在微波暗室中进行测试, 如图 16 所示. 在 13 GHz 处仿真与测试得到的 xoz 面和 yoz 面天线方向图如图 17 (a) 和图 17 (b) 所示, 由图 17 可以看出仿真与测试结果基本符合, 尤其是主瓣宽度. 不过由于测试环境的限制等因素, 旁瓣有一定区别. 宽带范围内仿真与测试得到的峰值增益如图 18 所示, 可以看出仿真与测试结果符合较好, 宽带范围内馈源的增益得到了明显的提高, 系统的 -1 dB 增益带宽达到了 24% (11—14 GHz), 在该频段系统增益相对于馈源增益平均提高了 9.6 dB, 其中在 12 GHz 处增益为 19.6 dBic, 口径效率达到了 54.8%. 图 19 为天线系统测试和仿真得到的轴比曲线, 可以看出 3 dB 轴比带宽达到了 29.8% (10—13.5 GHz).

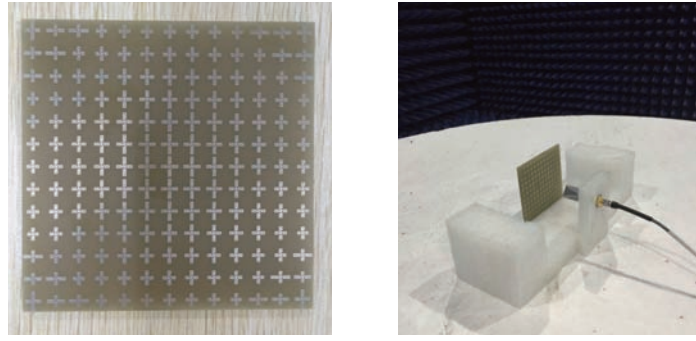


图 16 实物图

Fig. 16. The sample of antenna system.

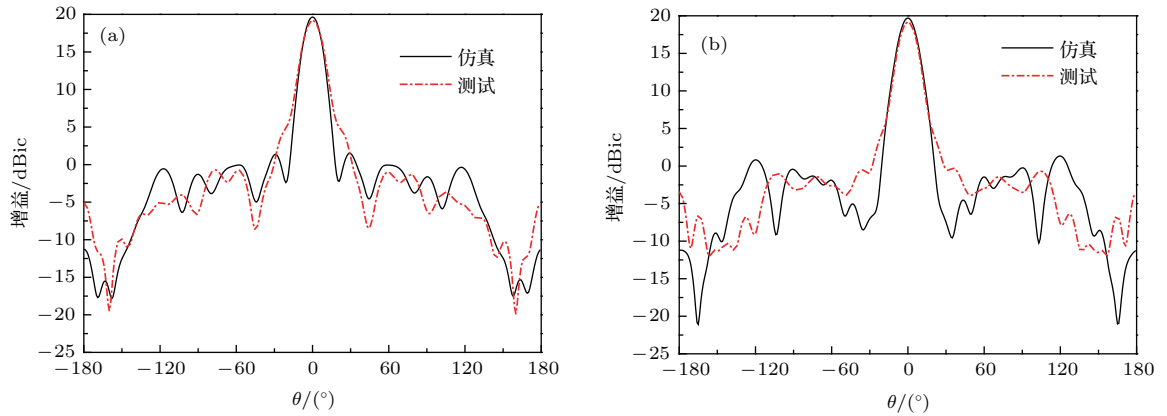


图 17 (网刊彩色) 13 GHz 处仿真与测试方向图 (a) xoz 面; (b) yoz 面

Fig. 17. (color online) Simulated and measured far field radiation patterns at 13 GHz: (a) xoz -plane; (b) yoz -plane.

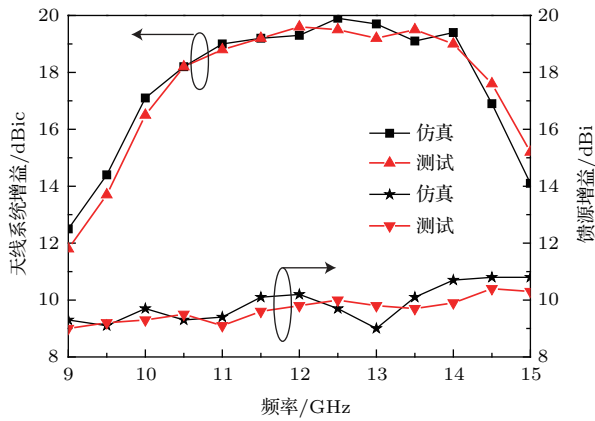


图 18 (网刊彩色) 天线系统与馈源天线增益

Fig. 18. (color online) Realized gain of antenna system and feed antenna.

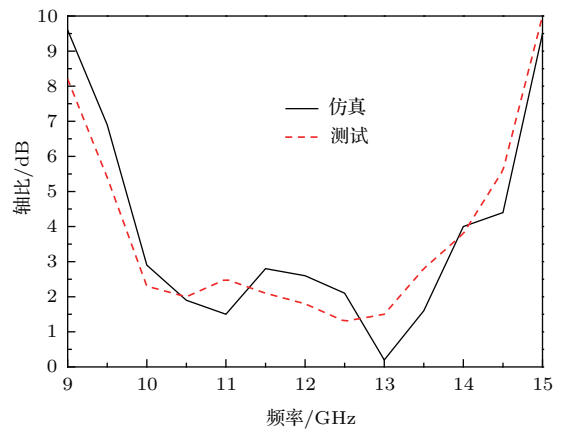


图 19 天线系统仿真与测试轴比

Fig. 19. Axial ratio of antenna system.

4 结 论

本文提出了一种宽带极化独立的单层反射型超表面单元, 结合线-圆极化转换原理以及聚焦超

表面设计原理, 构建了同时可以实现线-圆极化转换和聚焦的二维超表面. 在此基础上结合线极化馈源 Vivaldi 天线设计了宽带圆极化高增益天线, 仿真和测试结果符合, 表明天线系统的 -1 dB 增益带宽为 24%, 3 dB 轴比带宽为 29.8%, 并且具有较高

的口径效率. 该设计是多功能超表面的新应用, 为圆极化天线的设计提供了很好的思路, 具有显著的应用价值.

参考文献

- [1] Monticone F, Alù A 2014 *Chin. Phys. B* **23** 047809
- [2] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Wu X, Xu Z, Zhang A X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 094101 (in Chinese) [李勇峰, 张介秋, 屈少波, 王甲富, 吴翔, 徐卓, 张安学 2015 物理学报 **64** 094101]
- [3] Cai T, Wang G M, Zhang X F, Liang J G, Zhuang Y Q, Liu D, Xu H X 2015 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **63** 5629
- [4] Yu N F, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [5] Sun S L, He Q, Xiao S Y, Xu Q, Li X, Zhou L 2012 *Nat. Mater.* **11** 426
- [6] Li X, Xiao S Y, Cai B G, He Q, Cui T J, Zhou L 2012 *Opt. Lett.* **37** 4940
- [7] Estakhri N M, Alù A 2014 *Phys. Rev. B* **89** 235419
- [8] Yu N F, Aieta F, Genevet P, Kats M, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Nano Lett.* **12** 6328
- [9] Zhu H L, Cheung S W, Chung K L, Yuk T I 2013 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **61** 4615
- [10] Ma H F, Wang G Z, Kong G S, Cui T J 2014 *Opt. Mater. Express* **4** 1717
- [11] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Zheng L, Pang Y Q, Xu Z, Zhang A X 2015 *J. Appl. Phys.* **117** 044501
- [12] Chen H Y, Wang J F, Ma H, Qu S B, Zhang J Q, Xu Z, Zhang A X 2015 *Chin. Phys. B* **24** 014201
- [13] Ren L S, Jiao Y C, Li F, Zhao J J, Zhao G 2011 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **10** 407
- [14] Lei X, Chen G H, Zhao M Y, Zhang G Q 2014 *J. Microwaves* **30** 37 (in Chinese) [雷雪, 陈国虎, 赵明洋, 张广求 2014 微波学报 **30** 37]
- [15] Zhao G, Jiao Y C, Zhang F, Zhang F S 2010 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **9** 330
- [16] Cai T, Wang G M, Zhang X F, Shi J P 2015 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **14** 1072
- [17] Saeidi C, Weide D 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 113110
- [18] Ahmadi F, Namiranian A, Virdee B 2015 *Electromagnetics* **35** 93
- [19] Yu J B, Ma H, Wang J F, Feng M D, Qu S B 2015 *Chin. Phys. B* **24** 098102
- [20] Sun Y Y, Han L, Shi X Y, Wang Z N, Liu D H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104201 (in Chinese) [孙彦彦, 韩璐, 史晓玉, 王兆娜, 刘大禾 2013 物理学报 **62** 104201]
- [21] Hu D, Moreno G, Wang X K, He J W, Chahadih A, Xie Z W, Wang B, Akalin T, Zhang Y 2014 *Opt. Commun.* **322** 164

Broadband circularly polarized high-gain antenna design based on linear-to-circular polarization conversion focusing metasurface*

Li Tang-Jing[†] Liang Jian-Gang Li Hai-Peng Niu Xue-Bin Liu Ya-Qiao

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

(Received 21 April 2016; revised manuscript received 29 November 2016)

Abstract

A single-layer reflecting element is proposed based on the principle of linear-to-circular polarization conversion focusing metasurface, which can independently control the phases of x -polarized and y -polarized reflecting waves and operate in a broadband of 10–14 GHz. Following the generalized Snell's laws of reflection, a super cell is designed with a phase-gradient of -60° for x -polarized waves and 60° for y -polarized waves, and the simulation results show the well wideband anomalous reflection as expected. In the design of the multifunctional metasurface, the 13×13 unit cells are used to satisfy the parabolic profile and the focal-distance-to-diameter ratio is set to be 0.5. The phase compensation for forming a constant aperture phase is provided by the individual reflected elements with different structure parameters and $\phi_x - \phi_y = 90^\circ$ is used to realize polarization conversion. The designed sample is simulated in CST Microwave Studio and the results show that both of the x -polarized and y -polarized plane waves are well focused through the reflection of the focusing metasurface in a broadband of 10–14 GHz. Traditionally, multi-layer element is used to broaden phase coverage and bandwidth, the single-layer design in this paper greatly reduces the cost, processing difficulty and thickness of the lens. For further application, a linearly polarized Vivaldi antenna with a highest gain of 10 dB is located at the focal point of metasurface and the angle included between its polarization direction and x -axis is 45° in order to acquire right-handed circularly polarized reflecting wave. According to the reversibility principle of electromagnetic wave propagation, the spherical wave radiated by the feed antenna is converted into plane wave by the reflection of the focusing metasurface so that the antenna gain is remarkably enhanced. Simultaneously, the linearly polarized wave can be transformed into circularly polarized wave. Finally, the feed antenna and the metasurface are fabricated, assembled and measured. Numerical and experimental results are in good agreement with each other, which shows that the -1 dB gain bandwidth of the high-gain antenna is 24% (11–14 GHz) and the 3 dB axial ratio bandwidth is 29.8% (10–13.5 GHz). In addition, the gain at 12 GHz reaches a highest value of 19.6 dBic, and the aperture efficiency is more than 54%. The good performances indicate that the proposed broadband high-gain circularly polarized antenna has a well promising application in various communication systems. It is worth noting that the horizontally polarized, vertically polarized, right-handed circularly polarized and left-handed circularly polarized high-gain antenna can be realized with the rotation of feed antenna. In this case the idea is more versatile and valuable for designing the polarization reconfigurable antenna systems.

Keywords: metasurface, linear-to-circular polarization conversion, focusing, broadband

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Ja, 78.47.dc, 71.20.-b

DOI: 10.7498/aps.66.064102

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61372034).

† Corresponding author. E-mail: litangjing666@sina.com