

基于单层反射超表面的宽带圆极化高增益天线设计

李唐景 梁建刚 李海鹏

Broadband circularly polarized high-gain antenna design based on single-layer reflecting metasurface

Li Tang-Jing Liang Jian-Gang Li Hai-Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 104101 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.104101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.104101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I10>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种新型宽频带低损耗小单元左手材料的设计与实现

[Design and analysis of a new type of wideband low-loss and small size left-handed materials](#)

物理学报.2016, 65(9): 094101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094101>

单层超薄高效圆极化超表面透镜

[Ultra-thin single-layered high-efficiency focusing metasurface lens](#)

物理学报.2016, 65(7): 074101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074101>

一种基于石墨烯的超宽带吸波器

[An ultra-wideband absorber based on graphene](#)

物理学报.2016, 65(5): 054101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054101>

Ku 波段编码式电控超薄周期单元设计与验证

[Design and verification of an electronically controllable ultrathin coding periodic element in Ku band](#)

物理学报.2016, 65(5): 054102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054102>

基于极化旋转超表面的圆极化天线设计

[A circular polarization antenna designed based on the polarization conversion metasurface](#)

物理学报.2016, 65(2): 024101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024101>

基于单层反射超表面的宽带圆极化高增益天线设计*

李唐景[†] 梁建刚 李海鹏

(空军工程大学防空反导学院, 西安 710051)

(2016年1月7日收到; 2016年2月4日收到修改稿)

基于 Pancharatnam-Berry 相位原理, 设计了一种宽带圆极化反射聚焦超表面并将其应用到提高天线增益中. 首先提出了一种变形十字超表面单元, 在 11—16 GHz 频带范围内能够实现高效同极化转换, 并基于该单元构建了宽带反射聚焦超表面. 仿真结果表明, 垂直入射的右旋圆极化平面波宽带聚焦效果明显. 然后利用单向阿基米德螺旋天线对超表面进行照射, 其辐射的球面波经超表面反射后得到了近平面波, 有效地提高了天线的增益. 最终对所设计的天线系统进行加工并测试, 结果表明系统的 -1 dB 增益带宽达到 25% (12.5—16 GHz), 在该频带范围内峰值增益均高于 19 dBc 且轴比小于 3 dB. 此外, 在 12—15.5 GHz 范围内天线口径效率均超过 50%.

关键词: 超表面, 宽带, 圆极化, 高增益

PACS: 41.20.Jb, 71.20.-b, 29.27.Hj, 42.60.Lh

DOI: 10.7498/aps.65.104101

1 引言

2011年哈佛大学 Yu 等^[1]从费马引理出发推导出了广义折/反射定律, 并利用 V 形型纳米天线阵列构建了相应的相位梯度超表面, 实现了奇异折射以及旋光效应, 随后关于超表面的研究如雨后春笋般涌现. 超表面是人工超材料研究中延伸和拓展出的一类二维平面电磁结构, 它遵守广义 Snell 折/反射定律^[2], 由亚波长单元周期性排列构成, 可以在亚波长尺度内迅速改变电磁波的传播相位、幅度、极化等特性, 利用它的这些特性能够实现多种新奇的功能. 正是由于超表面可以对电磁波的激发和传输进行灵活的控制并且具有低剖面、易加工等优良特性, 越来越多的学者对超表面的研究产生了浓厚的兴趣, 研究成果被广泛报道, 包括极化转换^[3]、波束分离^[4]、波束扫描^[5]、低剖面天线^[6]、隐身衣^[7]、RCS 缩减^[8]以及全息成像等^[9]方面.

通常实现相位调控的方式有三种. 第一种是

改变结构尺寸, 例如同济大学 Wei 等^[10]通过改变金属圆环结构尺寸实现了高效透射波束指向调控; 复旦大学 Li 等^[11]通过改变 H 形单元尺寸实现相位变化, 设计了反射聚焦超表面. 而单层的尺寸渐变单元带宽很窄, 通常利用多层堆叠技术来展宽带宽, 这无疑增加了剖面的厚度而且不易加工, 成本大大增加. 第二种是加载有源器件, 例如南京大学 Zhu 等^[12]通过加载有源器件设计了可调阻抗超表面, 实现了对反射波相位 360° 调控; 东南大学 Cui 等^[13]提出了数字超表面, 为超表面可编程开辟了新道路, 但这种方法给设计增加了难度, 不易实现. 第三种是 Pancharatnam-Berry 相位原理^[14], 若单元不旋转, 则可以实现圆极化波的同极化转换, 例如 Li 等^[15]利用 N 形反射型单元设计了宽带圆极化波极化保持超表面. 若单元旋转, 则可以实现对圆极化波的相位调控, 例如空军工程大学李勇峰等^[16]利用旋转单元设计了具有长焦深和宽带的圆极化波反射聚焦超表面; 哈尔滨工业大学 Ding 等^[17]利用单层超薄旋转单元实现了对圆极化波透射相

* 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

位的调控, 传输效率接近理论计算得到的极限值. 这种方法在反射阵天线中也有所应用, Yu 等^[18]通过旋转单层裂缝方形环设计了圆极化反射阵天线, 但其 -1 dB 增益带宽仅为 2.6%, 最大口径效率为 53%; Zhong 等^[19]通过旋转单层双环开口结构设计了宽带圆极化反射阵天线, 其 -1 dB 增益带宽提高到 19.1%, 最大口径效率为 50%. 由此得到启发, 可以利用单层的旋转单元构建聚焦超表面, 设计宽带的圆极化高增益天线.

本文提出了一种单层宽带变形十字超表面单元, 在 11—16 GHz 频带范围内, 垂直入射的圆极化波可以高效地转换为同极化反射波. 利用旋转单元可以对圆极化波相位进行调控的原理, 设计了宽带二维反射聚焦超表面, 仿真结果表明, 在所设计的频带范围内聚焦效果明显. 根据光路可逆原理, 在焦点处放置一个宽带的平面阿基米德螺旋天线作为馈源, 辐射的圆极化球面波经聚焦超表面反射后得到近平面波, 很大程度上提高了馈源的增益. 由于设计好的超表面在不同频率处对应焦点的位置不同, 馈源的位置对于宽带天线系统的性能有直接影响, 通过仿真分析得到馈源放置的最佳位置. 为了验证设计的正确性, 我们加工并测试了所设计的天线系统, 测试结果与仿真结果符合较好, 表明天线的 -1 dB 增益带宽达到 25% (12.5—16 GHz), 3 dB 轴比带宽覆盖了增益带宽. 在 12—15.5 GHz 频带范围内系统的口径效率超过了 50%, 特别是在 13 GHz 处达到了 61%. 本文是超表面在提高天线增益中的应用, 为宽带高增益圆极化天线的设计提供了具体的思路, 有显著的应用前景.

2 旋转型宽带变形十字单元及聚焦超表面设计

2.1 单元设计

首先, 简要推导单元旋转控制电磁波相位的基本原理, 即 Pancharatnam-Berry 相位原理. 如图 1(a) 所示, 右旋圆极化波沿负 z 方向入射到单元表面, 入射波为

$$\mathbf{E}_i = (\hat{\mathbf{x}} + j\hat{\mathbf{y}}) e^{jkz}. \quad (1)$$

反射波为 (由于单元背板为全金属, 反射波幅度可认为不变)

$$\mathbf{E}_r = (\hat{\mathbf{x}} e^{j\varphi_x} + j\hat{\mathbf{y}} e^{j\varphi_y}) e^{-jkz}, \quad (2)$$

其中 ϕ_x 与 ϕ_y 分别为单元对入射波 x 和 y 方向两垂直分量产生的相移. 如图 1(b) 所示, 当单元逆时针旋转角度 θ 时, uv 坐标系与 xy 坐标系之间的关系可以表示为

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{u}} \cos \theta - \hat{\mathbf{v}} \sin \theta, \\ \hat{\mathbf{y}} = \hat{\mathbf{u}} \sin \theta + \hat{\mathbf{v}} \cos \theta. \end{cases} \quad (3)$$

则在 uvw 坐标系中入射波可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_i &= [(\hat{\mathbf{u}} \cos \theta - \hat{\mathbf{v}} \sin \theta) + j(\hat{\mathbf{u}} \sin \theta + \hat{\mathbf{v}} \cos \theta)] e^{jkz} \\ &= (\hat{\mathbf{u}} + j\hat{\mathbf{v}}) e^{jkz} \cdot e^{j\theta}, \end{aligned} \quad (4)$$

与之对应的反射波可以表示为

$$\mathbf{E}_r = (\hat{\mathbf{u}} e^{j\varphi_u} + j\hat{\mathbf{v}} e^{j\varphi_v}) e^{-jkz} \cdot e^{j\theta}. \quad (5)$$

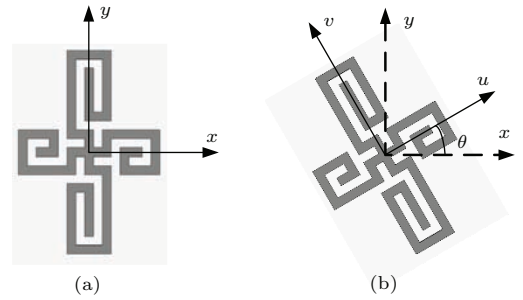


图 1 单元旋转示意图 (a) xyz 坐标系; (b) 旋转坐标系
Fig. 1. Diagram of spin element: (a) xyz coordinates; (b) rotation coordinates.

由图 1 可知, 在旋转后的 uvw 坐标系中单元对入射波在 u 方向产生的相移 ϕ_u 与旋转前的 xyz 坐标系中单元对入射波在 x 方向产生的相移 ϕ_x 是相等的, 即 $\phi_x = \phi_u$, 同理 $\phi_y = \phi_v$, 则 (5) 式可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_r &= [(\hat{\mathbf{x}} \cos \theta + \hat{\mathbf{y}} \sin \theta) e^{j\varphi_x} \\ &\quad + j(-\hat{\mathbf{x}} \sin \theta + \hat{\mathbf{y}} \cos \theta) e^{j\varphi_y}] e^{-jkz} \cdot e^{j\theta} \\ &= \frac{1}{2} [(\hat{\mathbf{x}} - j\hat{\mathbf{y}})(e^{j\varphi_x} - e^{j\varphi_y}) e^{j2\theta} \\ &\quad + (\hat{\mathbf{x}} + j\hat{\mathbf{y}})(e^{j\varphi_x} + e^{j\varphi_y})] e^{-jkz}. \end{aligned} \quad (6)$$

由 (6) 式可以发现, 此时反射波由右旋分量 $\mathbf{E}_{r(\text{RH})}$ 和左旋分量 $\mathbf{E}_{r(\text{LH})}$ 两部分组成:

$$\mathbf{E}_{r(\text{RH})} = \frac{1}{2} (\hat{\mathbf{x}} - j\hat{\mathbf{y}}) (e^{j\varphi_x} - e^{j\varphi_y}) e^{-jkz} \cdot e^{j2\theta}, \quad (7)$$

$$\mathbf{E}_{r(\text{LH})} = \frac{1}{2} (\hat{\mathbf{x}} + j\hat{\mathbf{y}}) (e^{j\varphi_x} + e^{j\varphi_y}) e^{-jkz}. \quad (8)$$

当 $|\phi_x - \phi_y| = \pi$ 时, (7) 式和 (8) 式变为

$$\mathbf{E}_{r(\text{RH})} = (\hat{\mathbf{x}} - j\hat{\mathbf{y}}) e^{j\varphi_x} e^{-jkz} \cdot e^{j2\theta}, \quad (9)$$

$$\mathbf{E}_{r(\text{LH})} = 0. \quad (10)$$

很明显反射波中只存在右旋圆极化波, 并且相位变化量为 2θ , 即单元旋转角度的 2 倍. 对于金属板

而言, 圆极化波入射时反射波与入射波的极化相反, 而利用旋转单元构成的超表面能够实现圆极化的同极化反射. 需要注意的是单元设计时要满足 $|\phi_x - \phi_y| \approx \pi$.

本文提出了一种变形十字超表面单元, 结构如图 2 所示. 介质基板采用相对介电常数为 2.65, 厚度 $h = 3 \text{ mm}$ 的聚四氟乙烯玻璃布板, 背面涂覆金属铜, 正面加载变形十字结构, 其中 $p = 5 \text{ mm}$, $k = 0.2 \text{ mm}$. 利用 CST Microwave Studio 对单元进行仿真, 其中 x 和 y 方向边界设为 unit cell, z 方向设为 open add space. 由于该单元在 x 和 y 方向具有极化独立的特性, 固定 y 方向金属枝节长度 n , 通过调节金属枝节长度 m 得到 x 极化波的反射相位如图 3 所示, 经过数据处理得到当 $m = 0.9 \text{ mm}$ 和 $m = 1.6 \text{ mm}$ 时相位差大约为 180° 且两条曲线平行度最好, 此时参数 m 和 n 即可分别确定为 0.9 和 1.6 mm . 图 4 为 x 极化波与 y 极化波在垂直入射条件下反射波的相位曲线, 在 $11\text{--}16 \text{ GHz}$ 频带范围内 $|\phi_x - \phi_y| = 180^\circ \pm 10^\circ$, 单元的相对工作带宽达到了 37%, 中心频点处单元的电尺寸仅为 $0.23\lambda_0$.

按照 Pancharatnam-Berry 相位原理, 在圆极化波入射的条件下, 单元可以实现同极化转换. 以右旋圆极化波照射为例, 反射波中右旋 (r_{RR}) 与左

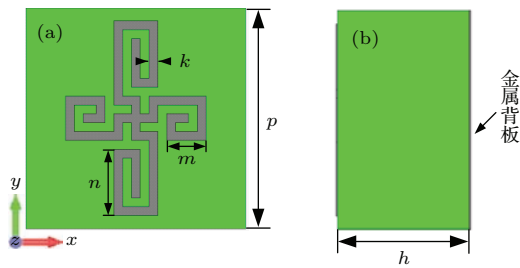


图 2 变形十字单元 (a) 主视图; (b) 侧视图
Fig. 2. Transformation cross element: (a) Top view; (b) perspective view.

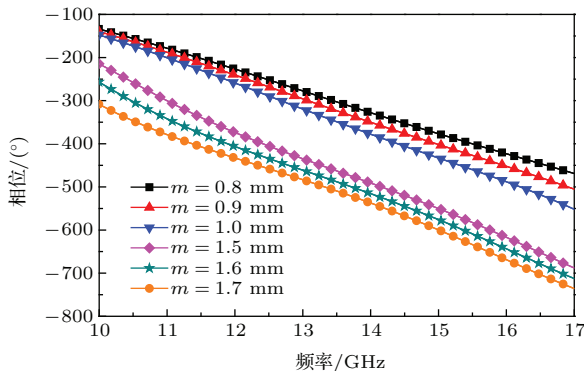


图 3 (网刊彩色) x 极化波的反射相位
Fig. 3. (color online) Reflected phase of x -polarized wave.

旋 (r_{LR}) 圆极化波的反射系数曲线如图 5 所示, 在 $11\text{--}16 \text{ GHz}$ 频带范围内 $r_{RR} > 0.95$, $r_{LR} < 0.2$, 实现了高效的同极化转换. 当入射角 β 改变时, 单元主极化反射相位曲线如图 6 所示, 可以看出当 $\beta < 45^\circ$ 时, 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.

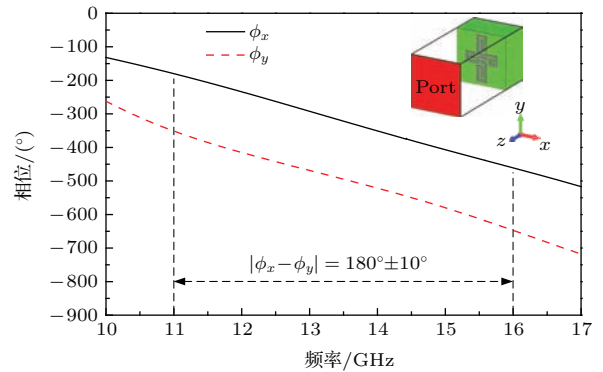


图 4 (网刊彩色) x 极化波与 y 极化波垂直入射条件下反射波的相位
Fig. 4. (color online) Reflected phase under x -polarized and y -polarized wave illumination.

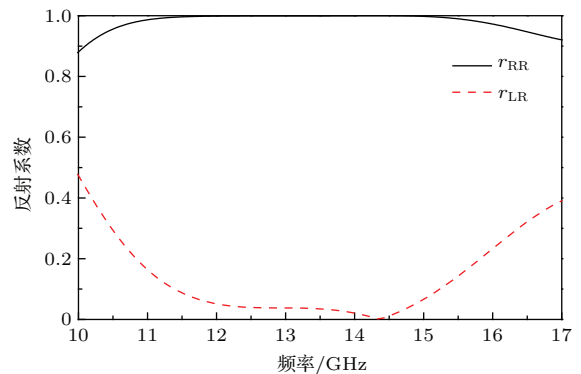


图 5 右旋圆极化波入射条件下的反射系数
Fig. 5. Reflection coefficient under right-handed circularly polarized wave illumination.

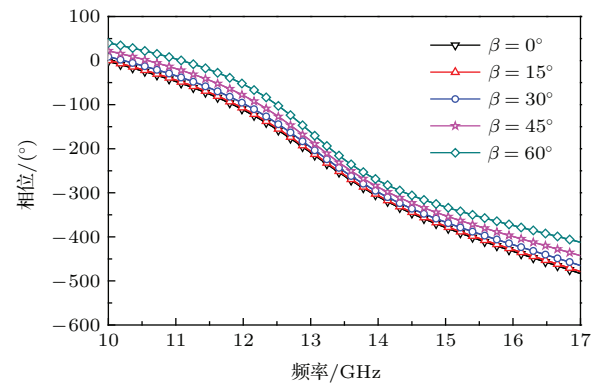


图 6 (网刊彩色) 不同入射角时单元主极化反射相位
Fig. 6. (color online) Reflected phase of co-polarization wave under different incident angle.

2.2 聚焦超表面设计

在验证了所提出的单元具有在较宽频带范围内实现高效同极化转换的功能后, 通过旋转单元可以补偿 $[0, 2\pi]$ 范围内的任意相位. 为了使垂直入射的平面波经反射后汇聚于一点, 根据相位补偿原理, 在 xoy 平面内各单元的相位分布应满足

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_0}(\sqrt{x^2 + y^2 + f^2} - f) + \varphi_0, \quad (11)$$

其中 f 是焦距, λ_0 是自由空间波长, φ_0 是原点处单元的初始相位. 我们以右旋圆极化波为例, 在中心频率 13.5 GHz 处, 选取焦距为 30 mm, 设计了一个由 15×15 个单元组成的聚焦超表面, 令原点处单

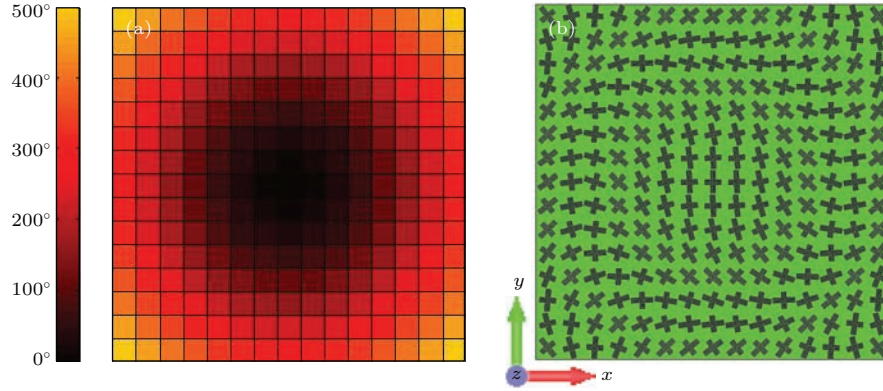


图7 (网刊彩色) 聚焦超表面 (a) 相位分布; (b) 单元分布

Fig. 7. (color online) Focusing metasurface: (a) Phase distribution; (b) element distribution.

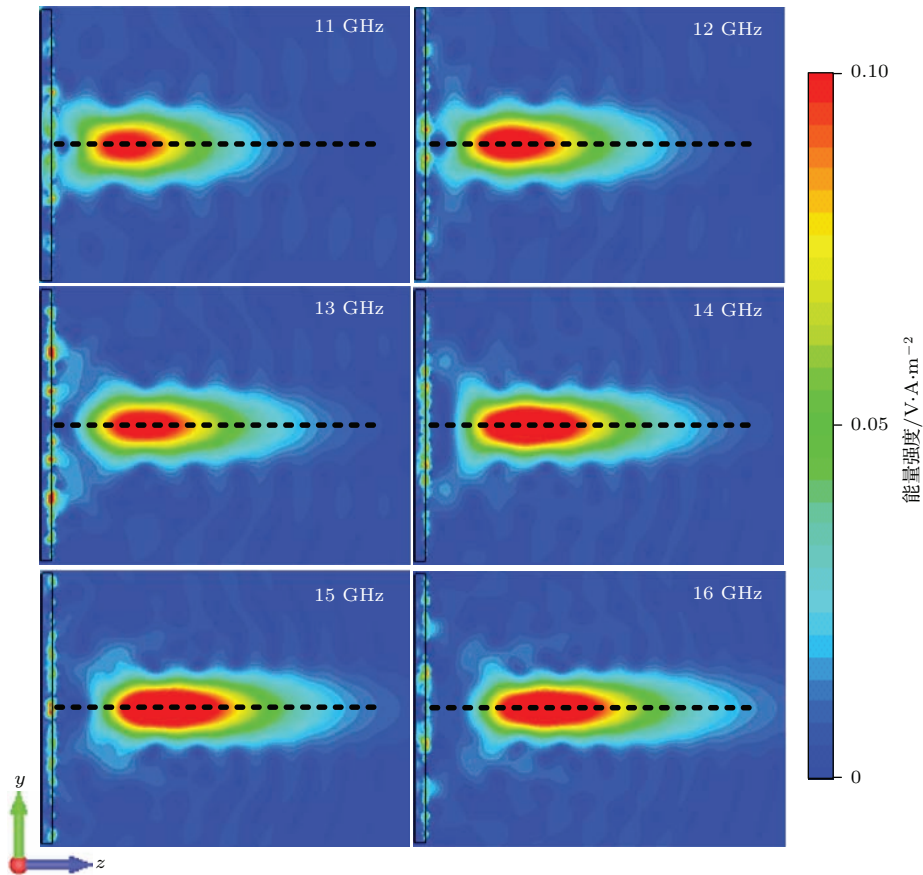


图8 (网刊彩色) 能量分布图

Fig. 8. (color online) The power-flow distribution in yoz plane.

元的相对相位为 0° ，根据(11)式计算出各位置处的相位分布如图7(a)所示，与之对应的单元分布如图7(b)所示。

在CST仿真设置中，右旋圆极化平面波沿负 z 方向垂直入射到聚焦超表面，图8为不同频率处 yo z面的能量分布图，在11—16 GHz频带范围内聚焦效果明显。计算不同频率处 z 轴上的能量强度，所得结果如图9所示，可以看出随着频率的增加，焦距增大。分析(11)式可知， $\varphi(x, y)$ 和 φ_0 保持不变，当频率增加时 λ_0 减小，焦距 f 会随之增大，仿真结果与之相符。

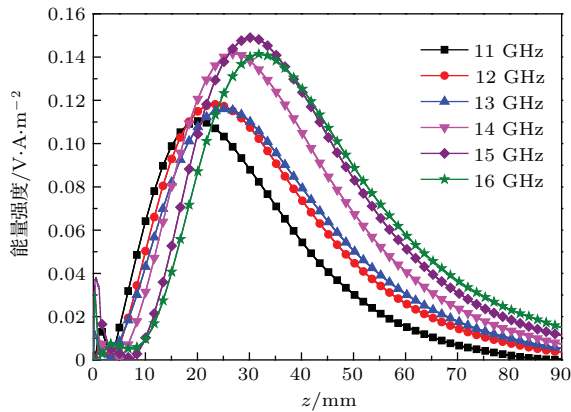


图9 (网刊彩色) z 轴能量强度

Fig. 9. (color online) The power intensity on z axis.

3 宽带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

上一节所设计的聚焦超表面在11—16 GHz频带范围内具有理想的聚焦效果，根据光路可逆原理，我们可以在焦点处放置一个宽带的单向平面阿基米德螺旋天线作为馈源，其辐射的球面波经反射后转变为近平面波，这样可以有效提高阿基米德螺旋天线的增益。由于不同频率所对应的焦距不同，馈源的位置将会影响系统的性能，将馈源天线在25—35 mm范围内移动进行多次仿真发现，当馈源置于28 mm处时天线系统的整体性能最佳。

图10为将馈源于28 mm处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阿基米德螺旋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，波束宽度变窄，有效地提高了增益。其中天线系统在15 GHz处增益达到了20 dBc，其三维辐射方向图如图11所示。

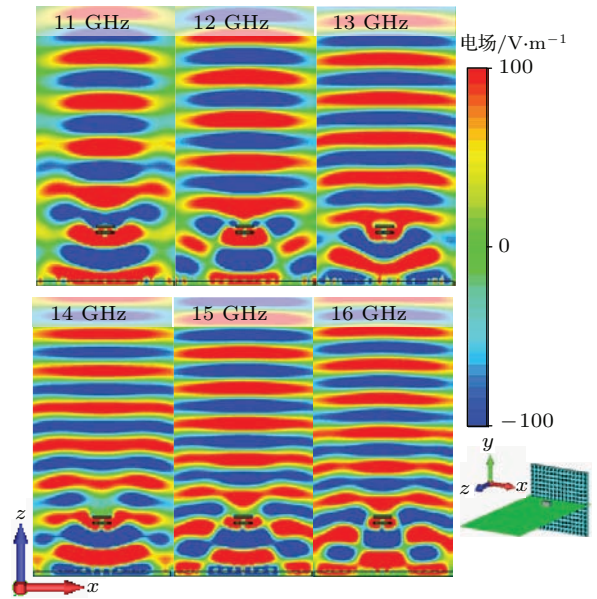


图10 (网刊彩色) 天线系统 xoz 面近场电场分布图

Fig. 10. (color online) Simulated electric field distribution in xoz plane.

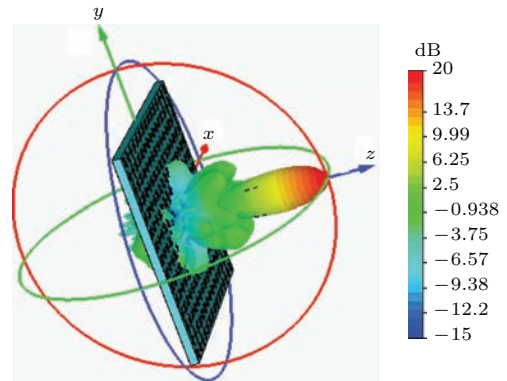


图11 (网刊彩色) 15 GHz处三维辐射方向图

Fig. 11. (color online) 3D simulated far field radiation pattern at 15 GHz.

3.2 加工测试

为了验证所设计的宽带高增益圆极化天线，我们加工组装了天线系统并在微波暗室中进行了测量，如图12所示。在10—17 GHz频带范围内仿真和测试得到的峰值增益和轴比分别如图13和图14所示，可以得到在12—16 GHz频带范围内阿基米德螺旋天线的增益平均提高了12.4 dBc，-1 dB增益带宽为25% (12.5—16 GHz)，3 dB轴比带宽为37% (11—16 GHz)，在12—15.5 GHz频带范围口径效率均超过了50%，特别是在13 GHz处达到了61%。

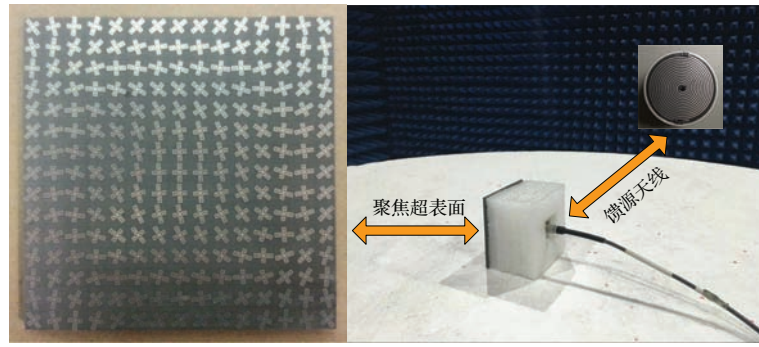


图 12 实物图

Fig. 12. The sample of antenna system.

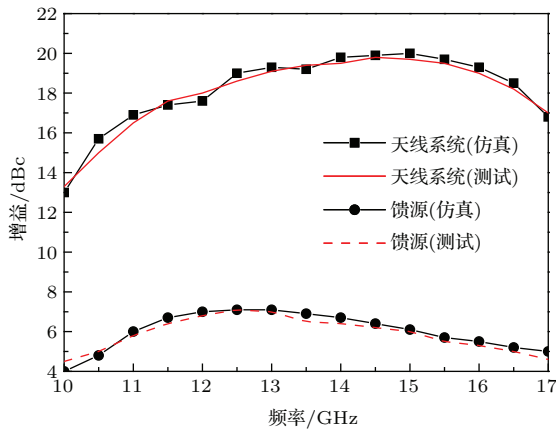


图 13 (网刊彩色) 天线系统与馈源天线增益

Fig. 13. (color online) Realized gain of antenna system and feed antenna.

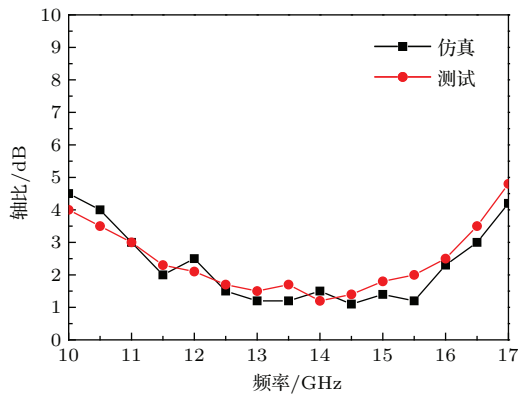


图 14 (网刊彩色) 天线系统仿真与测试轴比

Fig. 14. (color online) Axial ratio of antenna system.

4 结 论

本文提出了一种对于圆极化波高效同极化转换的宽带反射超表面单元, 根据相位补偿原理构建了聚焦效果理想的单层平面二维聚焦超表面, 并结合单向馈源阿基米德螺旋天线构成了焦距比为0.4的宽带高增益圆极化天线. 仿真和测试结果一致,

表明天线系统的 -1 dB 增益带宽为 25%, 3 dB 轴比带宽为 37%, 在 13 GHz 处口径效率达到了 61%. 本文为宽带高增益圆极化天线的设计提供了新的思路, 具有显著的应用价值.

参考文献

- [1] Yu N F, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [2] 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]
- [3] Yu N F, Aieta F, Genevet P, Kats M, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Nano Lett.* **12** 6328
- [4] Lee J H, Yoon J W, Jung J, Hong J K, Song S H, Magnusson R 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 233505
- [5] Cheng J, Mosallaei H 2014 *Opt. Lett.* **39** 2719
- [6] Cai T, Wang G M, Zhang X F, Shi J P 2015 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **14** 1072
- [7] Chen P Y, Argyropoulos C, Alù A 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 233001
- [8] Yan X, Liang L J, Zhang Y T, Ding X, Yao J Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 158101 (in Chinese) [闫昕, 梁兰菊, 张雅婷, 丁欣, 姚建铨 2015 物理学报 **64** 158101]
- [9] Kuznetsov S A, Astafev M A, Beruete M, Cía M N 2015 *Sci. Rep.* **5** 7738
- [10] Wei Z Y, Cao Y, Su X P, Gong Z J, Long Y, Li H Q 2013 *Opt. Express* **21** 010739
- [11] Li X, Xiao S Y, Cai B G, He Q, Cui T J, Zhou L 2012 *Opt. Lett.* **37** 4940
- [12] Zhu B O, Zhao J M, Feng Y J 2013 *Sci. Rep.* **3** 3059
- [13] Cui T J, Qi M Q, Wan X, Zhao J, Cheng Q 2014 *Light Sci. Appl.* **3** e218
- [14] Erez H, Vladimir K, Gabriel B, Avi N 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 328
- [15] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Zheng L, Zhou H, Xu Z, Zhang A X 2015 *Chin. Phys. B* **24** 014202
- [16] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Wu X, Xu Z, Zhang A X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 124102 (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** 124102]

- [17] Ding X M, Monticone F, Zhang K, Zhang L, Gao D L, Burokur S N, Lustrac A, Wu Q, Qiu C W, Alù A 2015 *Adv. Mater.* **27** 1195
- [18] Yu A, Yang F, Elsherbeni A Z, Huang J, Kim Y 2012 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **60** 1619
- [19] Zhong X J, Chen L, Shi Y, Shi X W 2015 *Electromagnetics* **35** 217

Broadband circularly polarized high-gain antenna design based on single-layer reflecting metasurface*

Li Tang-Jing[†] Liang Jian-Gang Li Hai-Peng

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

(Received 7 January 2016; revised manuscript received 4 February 2016)

Abstract

According to the Pancharatnam-Berry phase principle, a single-layer reflecting element is proposed for steering the phase of the electromagnetic wave. The structure of the element is composed of metabolic cross wire and copper ground sheet, which are separated by an FR4 dielectric substrate with a thickness of 3 mm. When the incident wave is circularly polarized, different rotary angles of the element are used to achieve the co-polarization reflection with high efficiency in a broadband of 11–16 GHz. In the design of the focusing metasurface, the phase compensation for forming a constant aperture phase is provided by the individual reflected element with a different rotated angle. Remarkably, the size of the element is only 5 mm ($0.23\lambda_0$), and then it can be more accurate to control the phase of the array. The focusing metasurface is composed of 15×15 elements with a focal length of 30 mm at 13.5 GHz. The designed sample is simulated in CST Microwave Studio. The results show that the incident circularly polarized plane wave is well transformed into a spherical wave in the band from 11 to 16 GHz, and the focal length is around 30 mm. For further application, a unidirectional Archimedean spiral antenna is located at the focal point of the metasurface. According to the reversibility principle of electromagnetic wave propagation, the spherical wave radiated by the feed antenna is converted into a plane wave by the reflecting metasurface, so that the antenna gain is remarkably enhanced. Through adjusting the distance between the feed antenna and the focusing metasurface, we find that 28 mm is the best distance. Finally, the feed antenna and the metasurface are fabricated, assembled and measured. Numerical and experimental results are in good agreement with each other, showing that the -1 dB gain bandwidth of the high-gain antenna is 12.5–16 GHz, and in this band the peak gains are all over 19 dBi and the axial ratio is better than 3 dB. In addition, the aperture efficiencies are more than 50% in the band from 12 to 15.5 GHz, especially the efficiency at 13 GHz reaches a highest value of 61%. The good performances indicate that the proposed high-gain antenna has a highly promising application in portable communication systems.

Keywords: metasurface, broadband, circularly polarized, high-gain

PACS: 41.20.Jb, 71.20.-b, 29.27.Hj, 42.60.Lh

DOI: 10.7498/aps.65.104101

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

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