

超薄宽带平面聚焦超表面及其在高增益天线中的应用

侯海生 王光明 李海鹏 蔡通 郭文龙

Ultra-thin broadband flat metasurface to focus electromagnetic waves and its application in high-gain antenna

Hou Hai-Sheng Wang Guang-Ming Li Hai-Peng Cai Tong Guo Wen-Long

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 027701 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.027701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.027701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

弛豫铁电体的键能与配位数模型

Bond energy and coordination number model for relaxor ferroelectrics

物理学报.2013, 62(1): 017701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.017701>

弛豫铁电体介电可调性的研究

Research on dielectric tunability of relaxor ferroelectrics

物理学报.2012, 61(21): 217701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.217701>

简化共沉淀法制备 $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ 陶瓷及其介电性能研究

Dielectric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics prepared by a simplified coprecipitation method

物理学报.2012, 61(20): 207701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.207701>

氧含量对 $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ 巨介电常数和介电过程的影响

Effect of oxygen content on giant dielectric constant and dielectric process in $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$

物理学报.2012, 61(19): 197702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.197702>

钛酸钡基施主掺杂弛豫铁电体介电弥散的唯象分析

Phenomenological analysis for dielectric dispersion of donor doped barium titanate based relaxor ferroelectric

物理学报.2012, 61(19): 197701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.197701>

超薄宽带平面聚焦超表面及其在高增益天线中的应用*

侯海生 王光明[†] 李海鹏 蔡通 郭文龙

(空军工程大学防空反导学院, 西安 710051)

(2015年9月17日收到; 2015年10月25日收到修改稿)

针对相位梯度超表面在灵活操控电磁波与提高天线增益中的潜在应用, 提出一种新型的宽带超表面单元, 实现了在较宽频带范围内操控电磁波波前与提高天线增益. 本文首先设计了一种圆环十字形对称单元来控制反射波的相移量, 单元厚度为1 mm, 尺寸为 $0.3\lambda_0$ ($\lambda_0 = 20$ mm), 工作频段15—18 GHz, 而后验证了由该单元组成的相位梯度超表面在15—18 GHz范围内对电磁波的奇异反射与聚焦特性. 最后将设计的反射聚焦超表面应用于提高天线增益中, 仿真与测试结果均表明, 天线最高增益在15—18 GHz内平均增加了11 dB且-1 dB增益带宽为15—18 GHz (相对带宽为18.2%). 由于厚度薄、重量轻、频带宽, 设计的该单元拓展了相位梯度超表面在微波领域的应用, 有望为高增益天线的实现提供新的方法.

关键词: 相位梯度超表面, 超薄, 宽带, 聚焦**PACS:** 77.22.-d, 73.61.-r, 84.90.+a**DOI:** 10.7498/aps.65.027701

1 引言

超材料是指自然界本身并不存在、人们依据电磁理论设计出来的人造材料, 具有负磁导率、负介电常数和零折射率等非常规的电磁特性. 近十年来, 研究者在超材料的理论研究、物理特性和应用方面取得了长足的进展^[1-6]. 超材料一般在吸波^[1]、隐身^[2]、极化转换^[3]等方面进展迅速. 超表面作为超材料的二维平面情形, 最近几年已成为超材料研究领域的热点和前沿. 其中, 相位梯度超表面(phase gradient metasurfaces, PGMS)^[7-11]因其可以实现对电磁波波前的任意控制^[12], 受到了科学工作者的广泛关注. 相位梯度超表面技术诞生于2011年, 最初由Yu等^[13]提出, 他们给出了广义折反射定律并利用纳米天线阵列构成PGMS对奇异反射/透射现象进行了验证. 一般相位梯度超表面是基于相位突变和极化控制思想设计的、由人工

微结构单元构成的遵守广义折反射定律的二维新型人工结构表面, 可对电磁波的激发和传输进行灵活的控制, 实现奇异反射/折射、极化旋转以及非对称传输等功能.

相位梯度超表面应用广泛, 很多学者都对其进行了深入研究. 中国科学院的Pu等利用对称的T形结构^[14], 在X波段成功设计了足够覆盖 $[0^\circ, 360^\circ]$ 的超表面单元, 并利用此单元实现了宽带奇异反射. Li等利用圆形结构在10 GHz附近通过控制透射过相位梯度超表面的透射波的方向, 实现了高效调控电磁波波束的功能^[15]. Zhou等采用H形结构^[10], 设计了单层反射相位梯度超表面, 实现了特定频带内的一维电磁波反射聚焦. Qu课题组采用开口谐振环(split ring resonator, SRR)设计了反射型相位梯度超表面^[16], 可将特定极化入射电磁波较高效地耦合为表面波^[17]. 同时利用高效的同极化反射超表面结构单元, 设计了一种高效的反

* 国家自然科学基金(批准号: 61372034)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wgming01@sina.com

射型圆极化相位梯度超表面^[18]. 李永峰等针对圆极化波通过同极化反射超表面结构单元的空间排布, 设计实现了一种二维非色散高效相位梯度超表面, 实现了相位梯度超表面可对左右旋入射波产生相反的相位梯度的功能^[19]. Huang 等通过不同旋向的短金属线结构单元空间排布, 实现了圆极化入射条件下的异常折射^[20,21]. 此外, 相位梯度超表面在极化转换^[22]、设计高增益天线、超薄隐身衣^[23]等方面也有重要应用.

然而超表面作为一种新兴的二维超材料, 对它的研究也刚刚起步, 已发表的文献在光学范围较多, 微波范围内对于相位梯度超表面奇异反射的研究工作集中于研究聚焦现象^[24–26], 应用到天线中的较少, 拓宽超表面带宽并应用的研究工作也不多. 本文首先提出一种圆环十字形对称单元, 该单元反射相位随尺寸变化较为平缓, 保证了其宽带工作. 而后利用该单元设计了一维相位梯度超表面与聚焦超表面, 验证了其在工作频带内对入射波的奇异反射与聚焦效果. 最后将设计的聚焦超表面应用到高增益天线中, 设计并实现了在 15–18 GHz 范围内的高增益天线, 天线增益最高达到 18.6 dB, 且 -1 dB 增益带宽为 15–18 GHz, 相对带宽为 18.2%. 由于厚度薄、重量轻、频带宽, 由该单元设计成的相位梯度超表面在高增益天线、电磁波操控方面有很大的应用潜力.

2 基于对称结构的超薄宽带超表面单元设计及奇异反射验证

2.1 广义反射定律

如图 1 所示, 当一束电磁波照射到两种介质分界面时, 遵守广义菲涅耳反射定律^[13]:

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

其中 θ_i 为入射角, θ_r 为反射角, λ_0 为入射波波长, n_i 是入射介质的折射率. 本文中电磁波从空气中入射, $n_i = 1$, 并且主要研究电磁波垂直入射条件下的奇异反射, 故 $\theta_i = 90^\circ$. 一般情况下, 相位梯度超表面通过 n 个相似超表面单元按一定的分布排列来实现, 其相移通常为 2π , 设沿渐变方向单元尺寸为 a , 相位梯度 ξ 可表示为

$$\xi = 2\pi/na = d\Phi/dx. \quad (2)$$

由 (1), (2) 式联立得电磁波垂直照射条件下的反射角为

$$\theta_r = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda_0}{2\pi} \times \xi \right). \quad (3)$$

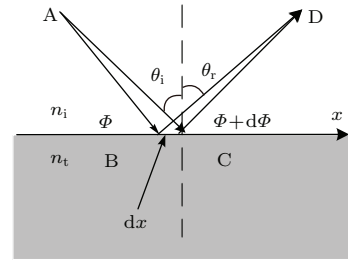


图 1 广义反射定律示意图

Fig. 1. Schematics used to derive the generalized law of reflection.

2.2 超薄宽带单元设计

制约超表面单元宽带特性的主要原因是, 一般设计的单元的 Q 值较大, 对频率变化较为敏感, 通过大量仿真我们发现对称结构的单元有利于降低超表面单元的 Q 值, 进而起到展宽工作带宽的作用. 为此, 我们通过 CST Microwave Studio 设计了图 2 所示的单元. 当 x 极化电磁波沿 $-z$ 轴垂直照射到该单元表面时, 通过改变金属贴片尺寸 r_1 来控

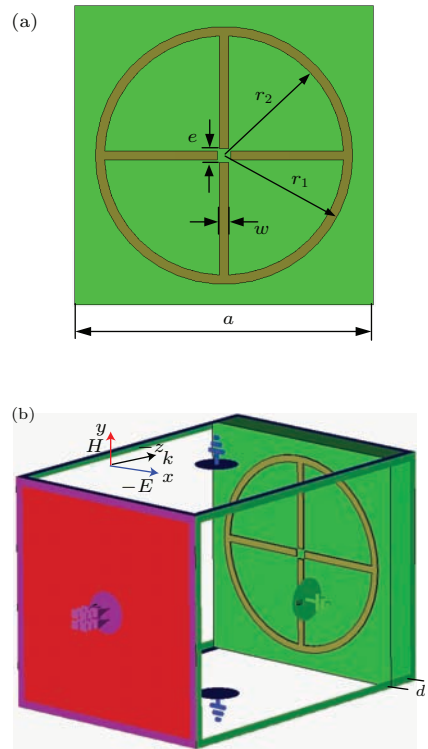


图 2 (a) 超表面单元结构; (b) 仿真设置

Fig. 2. (a) Structure of the PGMS element; (b) simulated setup.

制入射电磁波反射相位变化, 仿真时仿真边界条件 x 方向为电边界, y 方向为磁边界. 图 2 给出的相位梯度超表面单元的结构示意图中, 整个正方形单元由三层组成, 其单元边长为 $a = 6$ mm, 最底层金属背板的厚度为 $h = 0.036$ mm, 中间层为 $\epsilon = 4.3$, $\tan\delta = 0.001$ 的 FR4 介质板, 厚度为 $d = 1$ mm, 最上层金黄色部分为设计的金属贴片结构, 厚度为 h , 其余参数为 $e = 0.15$ mm, $w = 0.1$ mm, $r_2 = r_1 - w$.

为了实现对反射波波前准确控制, 反射相位变化需覆盖 $[0^\circ, 360^\circ]$ [27]. 在 15—18 GHz 处, 反射相位随着 r_1 (1.0—2.5 mm) 变化曲线如图 3 所示. 分析图 3 可知, 所设计的单元在不同频率处的反射相位曲线变化缓慢且平行性好, 满足相位差覆盖 $[0^\circ, 360^\circ]$ 的要求, 有利于实现 15—18 GHz 宽带超表面设计.

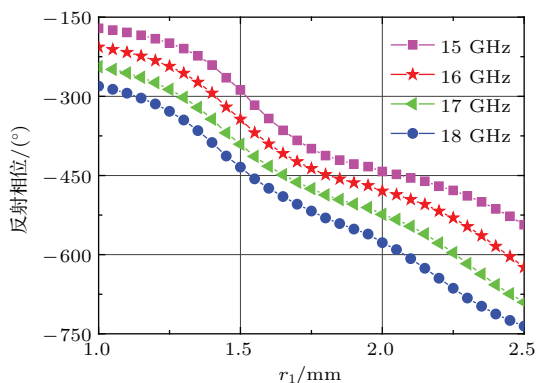


图 3 15—18 GHz 反射相位随 r_1 (1.0—2.5 mm) 变化曲线

Fig. 3. Reflected phase change with r_1 (1.0—2.5 mm) at (a) 15 GHz, (b) 16 GHz, (c) 17 GHz, (d) 18 GHz.

2.3 宽带奇异反射验证

为观察奇异反射, 在 $f = 15$ GHz 处设计相邻单元间相位差 $\Delta\Phi = 60^\circ$, 通过 CST Microwave Studio 对所设计的单元进行仿真, 在仿真结果中分别选取 r_1 的值如表 1 所列, 所选尺寸对应的相位符合广义反射定律的要求.

表 1 金属贴片 r_1 结构参数 (mm)

Table 1. Structural parameters of metallic patch r_1 (mm).

r_1 (1)	r_1 (2)	r_1 (3)	r_1 (4)	r_1 (5)	r_1 (6)
2.50	1.93	1.75	1.67	1.61	1.51

同时, 利用商业软件 CST Microwave Studio 对设计的相位梯度超表面进行全波仿真, 如图 4 所

示, x 方向极化波沿 $-z$ 方向垂直照射到梯度超表面上, 其中 y 方向为周期边界条件.

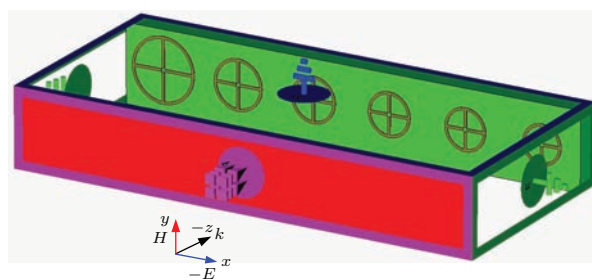


图 4 一维奇异反射结构

Fig. 4. Structure of one-dimensional anomalous reflection.

为了直观验证 15—18 GHz 频带内奇异反射情况, 我们观察 xoz 面内电场分布, 由图 5 可以清楚地看到垂直入射的平面波通过超表面时, 按照图中箭头所示反射到了其他方向, 证实了奇异反射现象. 同时我们观察到, 15 GHz 到 18 GHz 四个频点处反射角度相差不大, 有利于宽带聚焦的实现.

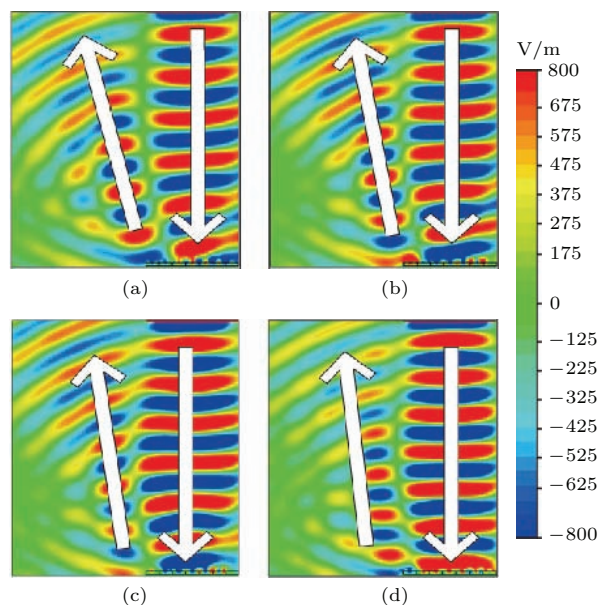


图 5 (网刊彩色) xoz 面内奇异反射仿真结果 (a) 15 GHz; (b) 16 GHz; (c) 17 GHz; (d) 18 GHz

Fig. 5. (color online) Simulated results of anomalous reflection at xoz -plane at (a) 15 GHz, (b) 16 GHz, (c) 17 GHz, (d) 18 GHz.

为了更进一步确定发生了奇异反射, 我们利用 CST Microwave Studio 仿真软件得到了图 6 所示的上述一维反射结构的 S_{11} . 观察图 6 我们发现, 15—18 GHz 处反射系数均小于 -10 dB, 进一步说明反射波发生了奇异反射.

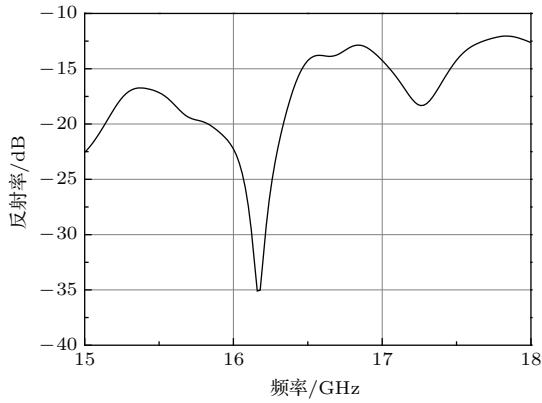


图6 一维奇异反射结构的 S_{11}

Fig. 6. S_{11} of one-dimensional anomalous reflection.

3 超薄宽带聚焦超表面设计、现象验证及在高增益天线中的应用

3.1 超薄宽带聚焦超表面设计

结合几何光学相关知识, 电磁波垂直入射时, 要使得反射波束汇聚, 根据相位补偿原理, 分界面处的相位分布满足如下抛物面方程:

$$\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_0}(\sqrt{x^2 + y^2 + L^2} - L) + \phi_1, \quad (4)$$

其中 L 为焦距, ϕ_1 为原点处 ($x = 0, y = 0$) 单元的反相相位. 图7展示了波束汇聚的原理图, 根据(4)式可知, 入射平面波经过超表面会在空间产生服从抛物面方程的相位分布, 并聚焦在焦点 f_0 处.

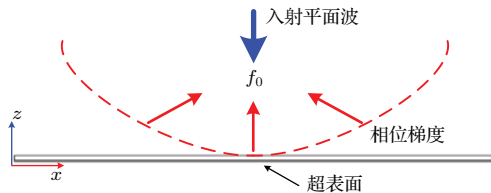


图7 聚焦原理示意图

Fig. 7. Schematics used to describe focusing effect.

在 $+x$ 方向上我们利用13个上面设计的超表面单元来覆盖 360° 相移, 同时在整个 x 方向上的相位分布满足(4)式, 二维相位梯度超表面在 xoy 平面内的相位分布满足图8, 通过将 $x = 1 \times 6, y = 0, \phi(1 \times 6, 0) - \phi_1 = \pi/36, \lambda_0 = 20 \text{ mm} (f = 15 \text{ GHz})$, 通过计算得焦距 $L = 64.7 \text{ mm}$, 同理计算可得16, 17, 18 GHz处得焦距分别为68.9, 73.3, 77.6 mm, 15—18 GHz内焦距相差并不大, 平均每个频点处焦距相差3 mm, 对宽带聚焦效果的影响不会很大.

由此可得由 25×25 个单元构成的相位梯度超表面反射聚焦阵列, 其物理尺寸为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$, 其在 CST Microwave Studio 内的模型如图9所示.

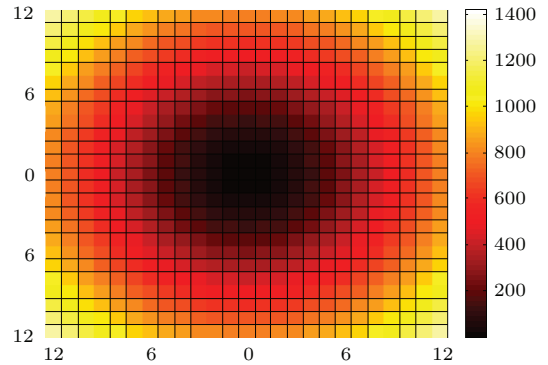


图8 (网刊彩色) xoy 平面内相对反射相位分布

Fig. 8. (color online) Relative reflection phase distribution in xoy -plane.

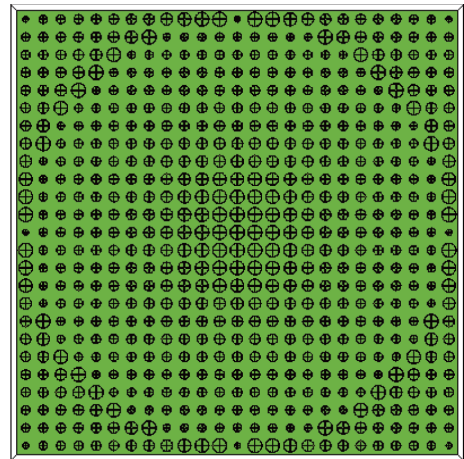


图9 相位梯度超表面反射聚焦阵列

Fig. 9. Reflected focusing array of phase gradient metasurfaces.

3.2 现象验证

为进一步验证超表面反射聚焦效果, 本文采用 CST Microwave Studio 进行仿真验证, 入射波沿 $-z$ 方向垂直入射超表面阵列, 图10给出了频点15—18 GHz处的 xoz 平面内电场分布.

分析图10可知, 电磁波经过焦点时会形成两个对称的球面波, 焦点为图中心的椭圆形, 入射的平面波均聚焦在焦点处, 焦点处电场幅度应该最大. 同时为了实现15—18 GHz宽带聚焦效果, 我们应该比较不同频率处焦距, 通过 CST Microwave Studio 仿真分析 $+z$ 上电场幅度, 得到了如图11所

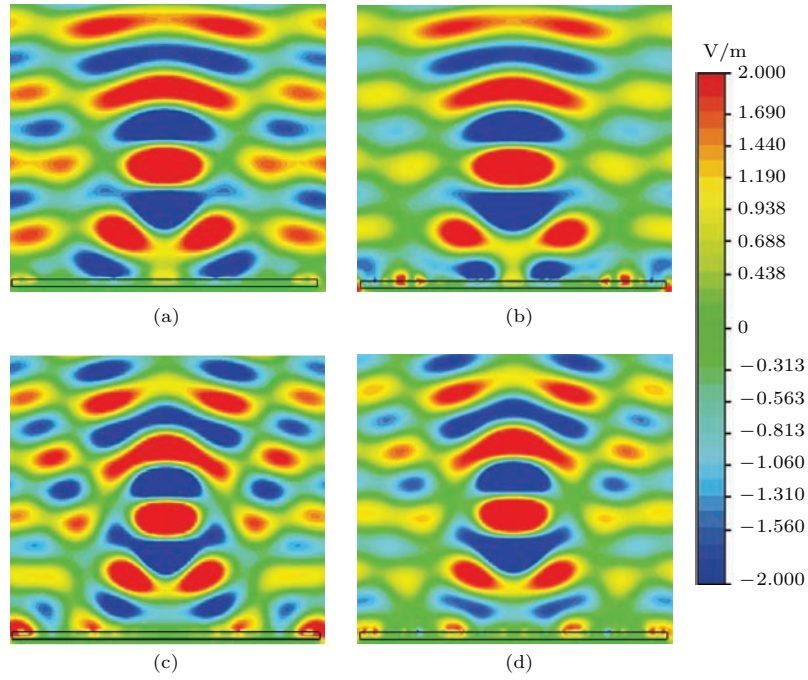


图 10 (网刊彩色) xoz 平面内仿真反射电场分布 (a) 15 GHz; (b) 16 GHz; (c) 17 GHz; (d) 18 GHz
 Fig. 10. (color online) Simulated reflected electric field distribution in xoz -plane at (a) 15 GHz, (b) 16 GHz, (c) 17 GHz, (d) 18 GHz.

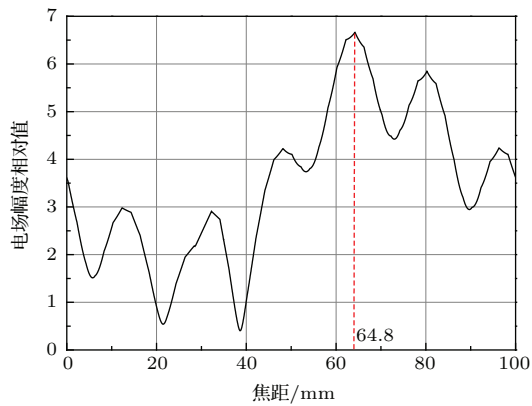


图 11 15 GHz 仿真焦距示意图

Fig. 11. Schematics of simulated focal distances at 15 GHz.

示的 15 GHz 对应的焦距示意图, 焦距大致在 $L = 64.8$ mm 处, 同理可得到 16, 17, 18 GHz 处的仿真焦距分别为 $L = 69.0$, $L = 73.8$ mm, $L = 77.9$ mm, 仿真和理论计算符合较好.

3.3 超薄宽带超表面在高增益天线中的应用

根据光路可逆原理, 我们将聚焦超表面用于高增益天线设计, 馈源采用 Vivaldi 天线, 图 12 中给出了本文设计的 Vivaldi 天线的参数和 S_{11} 曲线, 图 12(a) 中给出了所设计的 Vivaldi 天线的物理尺

寸. 分析图 12(b), 天线在 15—18 GHz 处的 S_{11} 均小于 -10 dB, 符合天线的设计要求, 因此将 Vivaldi 天线当作馈源, 置于 $L = 64.8$ mm 处.

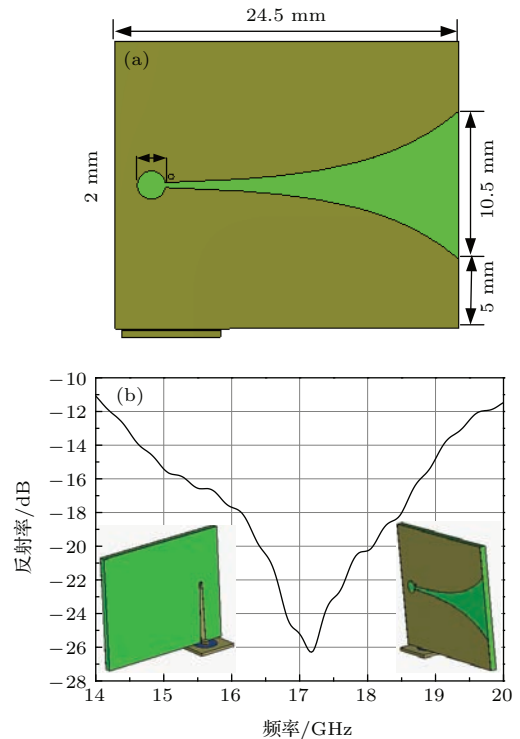


图 12 (网刊彩色) (a) Vivaldi 天线物理尺寸; (b) Vivaldi 天线的仿真 S_{11} 结果

Fig. 12. (color online) (a) Parameters of Vivaldi antenna; (b) simulated S_{11} of Vivaldi antenna.

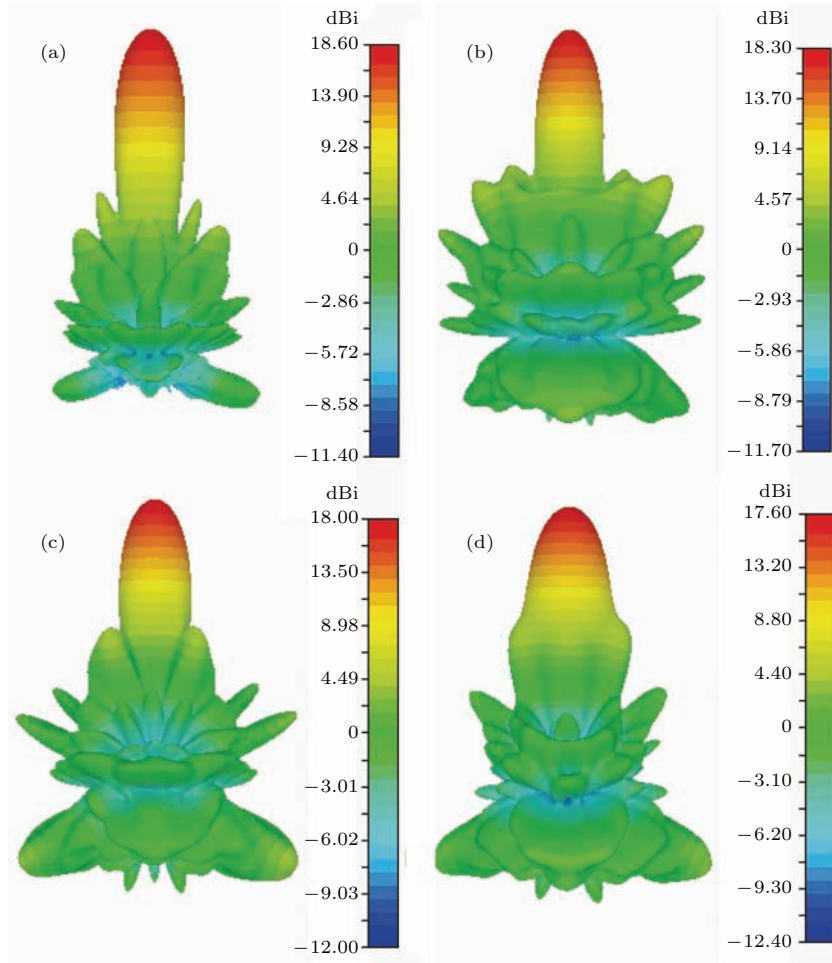


图 13 (网刊彩色) 3D 仿真远场方向图 (a) 15 GHz; (b) 16 GHz; (c) 17 GHz; (d) 18 GHz

Fig. 13. (color online) 3D simulated farfield radiation pattern for (a) 15 GHz, (b) 16 GHz, (c) 17 GHz, (d) 18 GHz.

经 CST Microwave Studio 仿真得到图 13(a), (b), (c), (d) 所示的天线在 15, 16, 17, 18 GHz 处 3D 远场辐射方向图, 分析可知, 天线波束近似针状, 能量聚集在针状波束处, 说明聚焦超表面明显增加了 Vivaldi 天线增益。

为了验证所设计的超表面的性能, 我们加工制作了如图 14 所示的超表面实物图和 Vivaldi 天线实物图, 测试中将 Vivaldi 天线放到焦距为 $L = 64.8 \text{ mm}$ 处, 测试过程如图 14(d) 所示。

通过远场测试, 得到了图 15 和图 16 中的结果, 图中展示了 xoz 平面内 Vivaldi 天线在有聚焦超表面和没有聚焦超表面时的仿真和测试结果. 分析图 15 和图 16 可知, 在 15—18 GHz 这四个频点处, 天线增益分别增加了 12, 11.5, 11.2, 11 dB, 仿真和实验结果符合得比较好, 同时计算可得 1 dB 增益相对带宽为 18.2%。

通过测试, 我们发现此超薄宽带聚焦超表面不仅宽带调控了反射电磁波的相位实现了奇异反射,

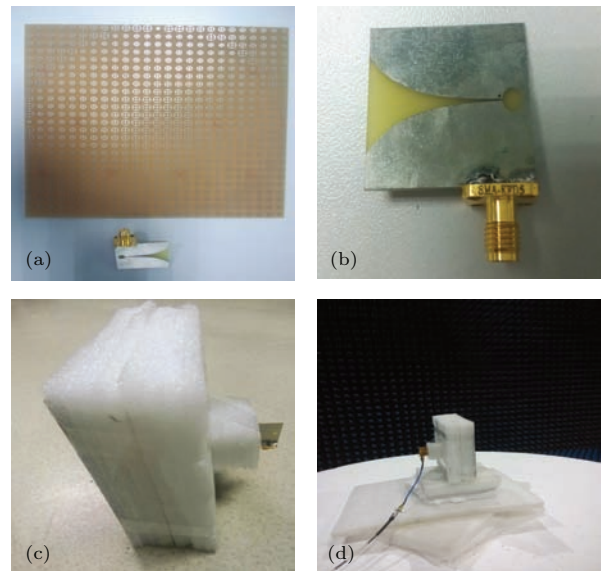


图 14 (网刊彩色) 实物图 (a) 超表面正视图; (b) Vivaldi 天线; (c) 高增益天线; (d) 测试图

Fig. 14. (color online) The photographs of (a) metasurfaces top view, (b) Vivaldi antenna, (c) high-gain antenna, (d) experiment.

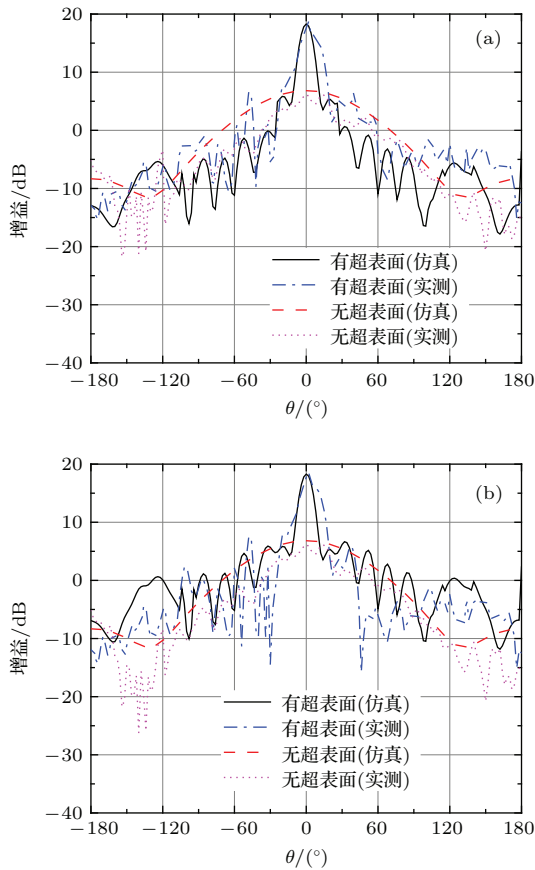


图 15 (网刊彩色) Vivaldi 天线在 xoz 平面内有/无超表面时仿真和测试远场辐射方向图 (a) 15 GHz; (b) 16 GHz

Fig. 15. (color online) Simulated and measured farfield radiation pattern at (a) 15 GHz and (b) 16 GHz of the Vivaldi antenna with and without the PGMS in xoz -plane..

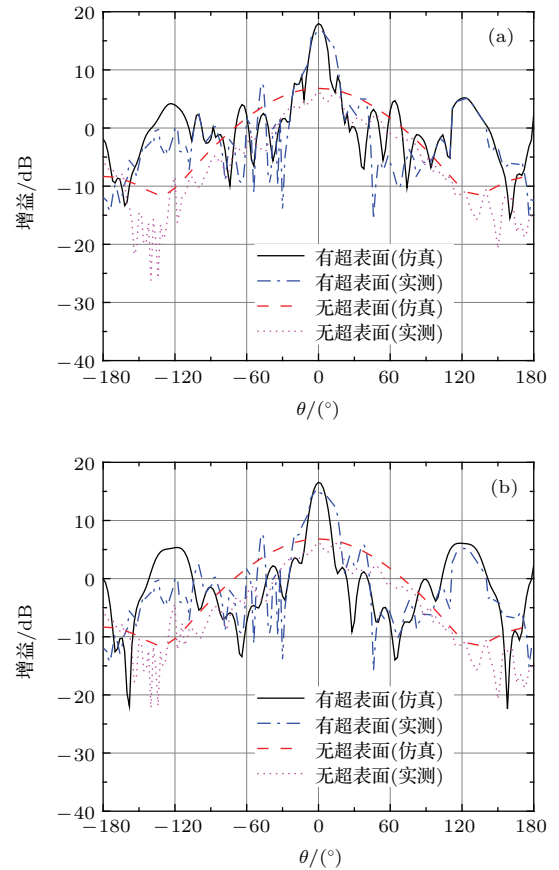


图 16 (网刊彩色) Vivaldi 天线在 xoz 平面内有/无超表面时仿真和测试远场辐射方向图 (a) 17 GHz; (b) 18 GHz

Fig. 16. (color online) Simulated and measured farfield radiation pattern at (a) 17 GHz and (b) 18 GHz of the Vivaldi antenna with and without the PGMS in xoz -plane..

而且在二维上实现了宽带聚焦功能, 提高了 Vivaldi 天线增益, 进一步增加了超表面的实用价值. 由于其具有超薄, 宽带, 设计便捷, 结构简单, 便于加工的特性, 有望用于高增益天线方面.

4 结 论

本文首先提出了一种超薄的新型宽带超表面单元, 单元厚度仅为 1 mm, 且工作带宽为 15—18 GHz, 而后利用该单元有效验证了在较宽频带范围内的奇异反射与聚焦现象, 最后将该单元构成的聚焦型超表面应用到高增益天线中, 天线增益最高达到 18.6 dB, 15—18 GHz 频带内, 天线增益平均提高了 11 dB 且 -1 dB 增益带宽为 15—18 GHz, 相对带宽为 18.2%, 由于厚度薄、重量轻、频带宽, 由该单元设计成的相位梯度超表面在高增益天线、电磁波操控方面有很大的应用潜力.

参考文献

- [1] Guo F, Du H L, Qu S B, Xia S, Xu Z, Zhao J F, Zhang H M 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 077801 (in Chinese) [郭飞, 杜红亮, 屈绍波, 夏颂, 徐卓, 赵建峰, 张红梅 2015 物理学报 **64** 077801]
- [2] Liu G C, Li C, Fang G Y 2015 *Chin. Phys. B* **24** 014101
- [3] Wu S, Huang X J, Xiao B X, Jin Y, Yang H L 2015 *Chin. Phys. B* **23** 127805
- [4] Cai T, Wang G M, Liang J G, Zhuang Y Q 2014 *Chin. Phys. Lett.* **31** 084101
- [5] Cai T, Wang G M, Zhang X F, Wang Y W, Zong B F, Xu H X 2015 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **63** 2306
- [6] Cai T, Wang G M, Zhang X F, Shi J P 2015 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **14** 1072
- [7] Francesco M, Andrea A 2014 *Chin. Phys. B* **23** 047809
- [8] Ni X, Emani N K, Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M 2012 *Science* **335** 427
- [9] Farmahini-Farahani M, Mosallaei H 2013 *Opt. Lett.* **38** 462
- [10] Li X, Xiao S Y, Cai B G, He Q, Cui T J, Zhou L 2012 *Opt. Lett.* **37** 4940

- [11] Wan X, Li Y B, Cai B G, Cui T J 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 151604
- [12] Luo J, Yu H L, Song M W, Zhang Z J 2014 *Opt. Lett.* **39** 2229
- [13] Yu N F, Genevet P, Kats A M, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [14] Pu M B, Chen P, Wang C T, Wang Y Q, Zhao Z Y, Hu C G, Huang C, Luo X G 2013 *AIP Advances* **3** 052136
- [15] Wei Z Y, Cao Y, Su X P, Gong Z J, Long Y, Li H Q 2013 *Opt. Express* **21** 010739
- [16] Wang J F, Qu S B, Ma H, Xu Z, Zhang A X, Zhou H, Chen H Y, Li Y F 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 201104
- [17] Wang W S, Zhang L W, Zhang Y W, Fang K 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024203 (in Chinese) [王五松, 张利伟, 张治文, 方恺 2013 物理学报 **62** 024203]
- [18] Wang J F, Qu S B, Ma H, Xu Z, Zhang A X, Zhou H, Chen H Y, Li Y F 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 201104
- [19] 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) [李永峰, 张介秋, 屈绍波, 王甲富, 吴翔, 徐卓, 张安学 2015 物理学报 **64** 094101]
- [20] Huang L L, Chen X Z, Bai B F, Tan Q F, Jin G F, Zentgraf T, Zhang S 2013 *Light: Science & Applications* **2** e70
- [21] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, Li G X, Bai B F, Tan Q F, Jin G F, Zentgraf T, Zhang S 2012 *Nano Lett.* **12** 5750
- [22] 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
- [23] Wang J F, Qu S B, Xu Z, Ma H, Wang X H, Huang D Q, Li Y F 2012 *Photon. Nanostruct. Fundam. Applic.* **10** 540
- [24] Aieta F, Genevet P, Kats M A, Yu N F, Blanchard R, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Nano Lett.* **12** 4932
- [25] Pors A, Nielsen M G, Eriksen R L, Bozhevolnyi S I 2013 *Nano Lett.* **13** 829
- [26] Saeidi C, van der Weide D 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 053107
- [27] Kang M, Feng T H, Wang H T, Li J S 2012 *Opt. Express* **20** 15882

Ultra-thin broadband flat metasurface to focus electromagnetic waves and its application in high-gain antenna*

Hou Hai-Sheng Wang Guang-Ming[†] Li Hai-Peng Cai Tong Guo Wen-Long

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

(Received 17 September 2015; revised manuscript received 25 October 2015)

Abstract

The phase gradient metasurface has strong abilities to manipulate electromagnetic waves on a subwavelength scale and has a potential to enhance the antenna gain. Based on the single multi-resonance metallic patch structure, we propose a new kind of ultra-thin broadband unit cell to manipulate electromagnetic waves and enhance the gain. It has been demonstrated that anomalous reflection can be achieved by utilizing the magnetic resonance between metallic patch and ground plane. Moreover, it is believed that resonance with low quality factor (Q factor) is useful in extending the working bandwidth. In order to extend the bandwidth of phase modulation, it is necessary to design a kind of low- Q unit cell. Besides, we need to extend the phase shift to cover the entire range $[0^\circ, 360^\circ]$ to achieve the focusing effect. Thus we design a suitable symmetrical unit cell composed of ring and cross metallic patterns to control the phase of reflected waves. The symmetrical structure is useful for decreasing the Q factor so as to get a kind of low- Q unit cell. Theoretically, ring and cross metallic patch can be regarded as multi-resonance unit cells, which can cover the entire scope $[0^\circ, 360^\circ]$. The unit cell operates at 15–18 GHz with a thickness of 1 mm and the sides of $0.3\lambda_0$ ($\lambda_0 = 20$ mm). Furthermore, we design a phase gradient metasurface composed of the designed unit cell to verify the broadband anomalous reflection and focusing effects in CST Microwave Studio; the effect can be clearly illustrated in the simulation results obtained at 15–18 GHz. Due to the successful conversion from plane wave to quasi-spherical wave, we can place the Vivaldi antenna at the focal point of the metasurface as a feed source to transform the quasi-spherical wave to plane wave to enhance antenna gain. The simulation results are in good agreement with the theoretical analysis. Meanwhile, the designed metasurface and Vivaldi antenna have been fabricated and applied to enhance the gain of Vivaldi antenna. Both simulation and test results show that the peak gain has been averagely enhanced by 11 dB during the -1 dB gain bandwidth of 15–18 GHz and the fractional bandwidth is 18.2%. Moreover, due to the thin thickness, light weight and broad band, the designed unit cell may open up a new route for the applications of phase gradient metasurfaces in the microwave band region, and may also be used as an alternative of high-gain antenna.

Keywords: phase gradient metasurfaces, ultra-thin, wideband, focusing

PACS: 77.22.-d, 73.61.-r, 84.90.+a

DOI: 10.7498/aps.65.027701

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

[†] Corresponding author. E-mail: wgming01@sina.com