

基于惠更斯超表面的高增益透镜天线

马彬 吴雄斌 唐李光 高喜

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要 提出了一种新型惠更斯超表面,其结构单元是将两个开口谐振环和一个S型的弯折线分别刻蚀在F4B介质板的两侧形成,通过调整开口谐振环和S型弯折线的结构参数,能够对电磁波实现 0° - 360° 的相位调控以及透射率高于0.85的透射系数.同时,将所设计的超表面加载在喇叭天线的口径面上,将球面波转换为平面波,从而实现天线增益的大幅度提高.仿真和实验测试结果表明,在13.2-16.6 GHz(相对带宽22.82%)的频带范围,天线最高增益达18.7 dB.与未加载透镜的喇叭天线相比,在工作频带内的增益平均增加了3.62 dB.

关键词 透镜天线;惠更斯超表面;高增益

中图分类号 TN015

文献标识码 A

0 引言

透镜天线是一种口径天线,能够将馈源辐射的球面波转换为平面波,从而提高天线的增益,因此具有旁瓣和后瓣小,方向性好等优点.透镜天线的种类很多,常见的透镜天线有介质延时透镜^[1]、金属加速透镜^[2]、渐变折射率平板透镜^[3]和超表面透镜^[4].

惠更斯超表面是一种新型超表面,其单元结构由电谐振部分和磁谐振部分组成,分别对电场和磁场进行调控,从而实现对电磁波的自由调控^[5-8].由于惠更斯超表面对电磁波出色的调控能力,而广泛应用于波束偏转^[10]、平板透镜^[9,15]、极化转换器^[12-14]、成像系统^[11]的设计.

本文设计了一种新型惠更斯超表面,通过调整结构参数,能够实现全相位覆盖和较高的透射系数.通过合理排布单元结构,形成超表面透镜,并将其加载在喇叭天线的口径面上,能够将喇叭天线辐射的球面波在口径面处转换为平面波,从而大幅度提高天线的增益.仿真和实验结果表明,在13.2-16.6 GHz的宽频带范围内,透镜天线的反射系数小于-10 dB,天线增益比未加载透镜的喇叭天线增益提高了0.81-7.02 dB(平均增加3.62 dB),最高增益达到18.7 dB.

1 惠更斯超表面单元的设计

惠更斯超表面在结构上由电谐振和磁谐振两部分,通过调节电谐振和磁谐振的结构参数,能够实现对电场和磁场的调控.因此,惠更斯超表面的电磁特性可以用电表面导纳 Y_s 和磁表面阻抗 Z_{ms} 来描述.如图1所示,区域1是沿 z 轴传输的入射电磁波,区域2是透射波.由边界条件,可求得表面电流 J_s 和表面磁流 M_s .

$$J_s = z \times (H_2 - H_1), M_s = -z \times (E_2 - E_1), \quad (1)$$

其中 $E_1 = E_i + E_r$, $E_2 = E_t$, $H_1 = H_i + H_r$, $H_2 = H_t$, 表面电流 J_s 和表面磁流 M_s 与电表面导纳 Y_s 和磁表面阻抗 Z_{ms} 之间的关系可以表述为

收稿日期:2020-01-31

基金项目:国家自然科学基金项目(61761010);广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA281193);桂林电子科技大学研究生创新项目(2020YCXS036);桂林电子科技大学研究生教育创新计划项目(2018YJXC24)资助

通讯作者:高喜,男,汉族,博士,教授,研究方向:电磁超材料理论及应用,E-mail:gao_xi76@163.com.

$$\mathbf{J}_s = \overline{Y}_{es} \cdot \mathbf{E}_{tan}, \mathbf{M}_s = \overline{Z}_{ms} \cdot \mathbf{H}_{tan}, \quad (2)$$

其中 \mathbf{E}_{tan} 和 \mathbf{H}_{tan} 分别是超表面上的电场和磁场的切向分量.

超表面的传输系数 T 和反射系数 R 与电表面导纳 Y_{es} 和磁表面阻抗 Z_{ms} 之间的关系可以表述为

$$Y_{es} = \frac{2}{\eta_0} \cdot \frac{1-T-R}{1+T+R}, \quad Z_{ms} = 2\eta_0 \cdot \frac{1-T+R}{1+T-R}, \quad (3)$$

其中 η_0 是自由空间的波阻抗. 当惠更斯超表面的透射系数为 1 时, 归一化电表面导纳 $Y_{es} \cdot \eta_0$ 和归一化磁表面阻抗 $\frac{Z_{ms}}{\eta_0}$ 的实部为 0, 虚部相等.

根据上述原理, 我们设计了一种新型惠更斯超表面单元, 如图 2(a) 所示. 图中 S 型弯折线代表电谐振, 两个开口环谐振环代表磁谐振, 且弯折线和开口谐振环分别刻蚀在 F4B 介质板 ($\epsilon_r = 2.65$, $\tan \delta = 0.001$) 的两侧, 介质基底的厚度为 0.8 mm, 其他结构参数为: $h = 1$ mm, $a = 3$ mm, $b = 1.5$ mm, $w = 0.2$ mm, $g = 0.2$ mm, $l = 2.58$ mm 以及 $g = 1.34$ mm. 图 2(b) 和 (c) 分别为单元结构的正面和背面. 为了研究该惠更斯超表面的电磁特性, 我们采用商用电磁仿真软件 CST 对其进行仿真分析. 计算中, 为了模拟周期结构, 将 x 和 y 方向上的边界条件设置为 unit cell, 而 $-z$ 方向为电磁波的传输方向. 同时, 假定入射波为 y 极化的均匀平面波. 为了研究结构单元的谐振机理, 我们首先观察了 15 GHz 频率下单元结构的表面电流分布, 如图 2(d) 和 (e) 所示. 由图 2(d) 可知, 电流沿着 S 型弯折线分布, 为电谐振; 而由图 2(e) 显示的电流分布可知, 电流沿着两个开口谐振环分布, 形成电流环, 为磁谐振. 根据上述描述的理论可知, 所设计的超表面为惠更斯超表面. 进一步的研究表明, 结构参数 l 和 g 是调控电磁特性的主要参数, 改变 l 和 g 能有效调控电磁波的相位以及超表面的电表面导纳和磁表面阻抗, 但是对电磁波透射率影响不大, 这为我们设计高性能透镜提供了物理条件. 为了实现平面波聚焦, 超表面透镜的相位分布由公式(4)计算求得

$$\Phi(x, y) + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{x^2 + y^2 + F^2} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot F + \Phi_0, \quad (4)$$

其中 $\Phi(x, y)$ 是超表面的相位分布, λ 是自由空间波长, F 是焦距, Φ_0 超表面中心位置处的透射相位. 根据公式(3)-(4), 可以得到焦距为 $F = 35$ mm 时, 透镜的结构参数, 如表 1 所示.

表 1 惠更斯超表面单元的透射系数和透射相位以及对应的电表面导纳和磁表面阻抗

l /mm	g /mm	透射系数	透射相位/ $^\circ$	$\text{Im}(Y_{es} \cdot \eta_0)$	$\text{Im}(Z_{ms}/\eta_0)$
2.58	1.34	0.88	0	0.2699	-0.2530
2.52	1.44	0.91	27	-0.4394	-0.5453
2.46	1.56	0.95	60	-0.9182	-1.0122
2.42	1.62	0.97	95	-2.1574	-2.3832
2.38	1.70	0.96	121	-3.5100	-4.3129
2.36	1.76	0.96	148	-6.6126	-6.6967
2.28	1.86	0.96	180	-19.5006	-18.2014
2.18	2.02	0.95	-150	7.0027	6.6729
1.92	2.48	0.92	-118	3.6058	2.2309
1.88	1.92	0.9	-90	2.7164	1.8007
2.82	0.92	0.92	-62	1.2898	0.7661
2.62	1.26	0.85	-27	0.7289	0.5766

图 3(a) 为设计得到的惠更斯超表面透镜的整体结构, 为了证实透镜的聚焦功能, 采用 CST 对其进行电磁仿真, 仿真中采用 y 极化平面波激励超表面透镜. 图 3(b)-(d) 为仿真结果, 其中图 3(b) 和 (c) 分别是 zox 面和 $yozy$ 面的电场分布, 图 3(d) 为 $z = -35$ mm 处 xoy 面内的电场能量分布. 由仿真结果可以看出, 该透镜具有较好的聚焦功能, 与理论预测结果相符.

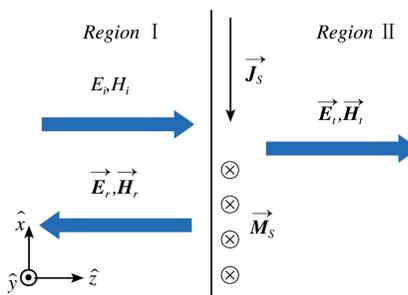


图 1 惠更斯超表面的工作原理

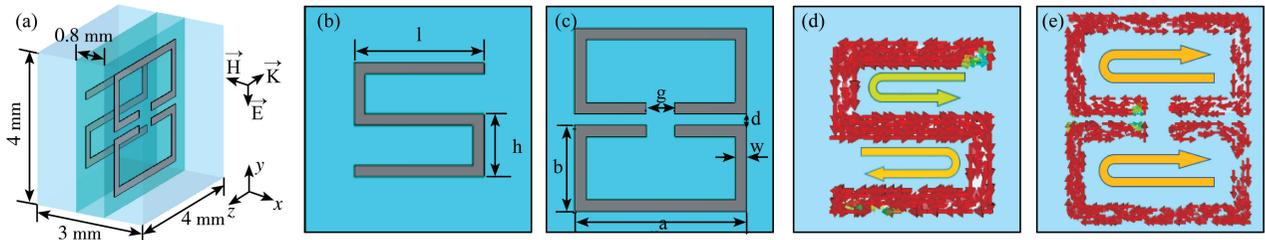


图 2 惠更斯超表面单元(a) 单元结构图;(b) 电谐振部分结构图;(c) 磁谐振部分结构图;
(d) 电谐振表面电流;(e) 磁谐振表面电流

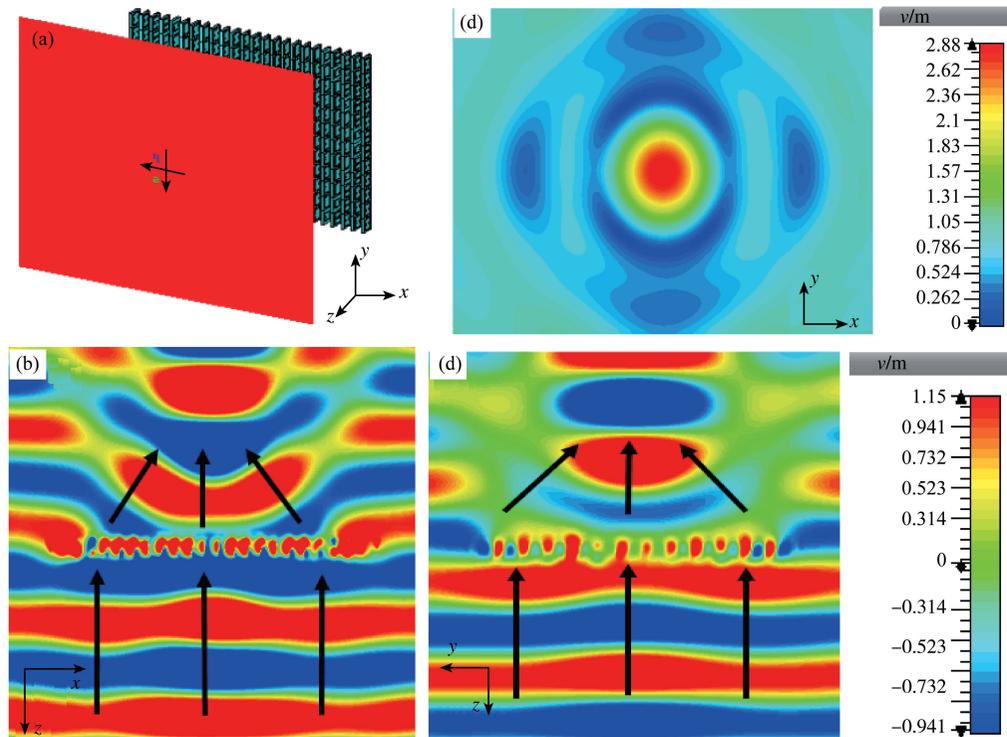


图 3 惠更斯超表面透镜(a) 惠更斯超表面透镜结构;(b) 平面波入射时 xoz 面的电场分布;
(c) 平面波入射时 $yoiz$ 面的电场分布;(d) $z = -35$ mm 处 xoy 面的电场能量分布

2 高增益透镜天线的设计

对于 y 极化喇叭天线,其辐射电磁波在天线口径面出的分布满足

$$\mathbf{E}_1 = yE_1 \exp(-jk \sqrt{x^2 + y^2 + s^2}), \quad \mathbf{H}_1 = x \frac{E_1}{\eta_0} \exp(-jk \sqrt{x^2 + y^2 + s^2}), \quad (5)$$

其中 x, y 为口径面的坐标, s 为喇叭天线的相位中心. 由方程(5)可知,天线口径面出的电磁波为球面波,这影响了天线的增益. 如果在喇叭天线的口径面出加载一透镜,该透镜能够将天线口径面的球面波转换成平面波进行辐射,则天线的增益能得到大幅度高. 基于这一思想,我们把设计的惠更斯超表面透镜加载在喇叭天线的口径面处,且让透镜的焦点刚好与喇叭天线的相位中心重合,这样就能将天线口径面处的球面波转换为平面波辐射,从而提高天线增益.

加载透镜的喇叭天线如图 4 所示,天线口径面的尺寸是 $76 \text{ mm} \times 57 \text{ mm}$,喇叭天线相位中心到天线口径面的距离为 30 mm (此距离刚好等于透镜的焦距). 为了方便固定透镜,在天线的出口面加了一个高度为 5 mm 的矩形金属框. 为了研究天线的辐射性能,我们利用 CST 全波仿真软件对透镜天线的场分布进行电磁仿真,并与未加载透镜的天线进行对比,结果如图 5 所示. 图 5(a)是未加超表面透镜的喇叭天线的电场分布,图 5(b)和(c)分别是加载超表面后透镜天线 xoz 面和 $yoiz$ 面的电场分布. 通过比较发现,对于没有加载透镜的天线,天线辐射的电磁波为球面波,而在口径面出加载惠更斯超表面透镜后,该透镜能够将球面波转换为平面波进行辐射,这将有效提高天线的辐射性能.

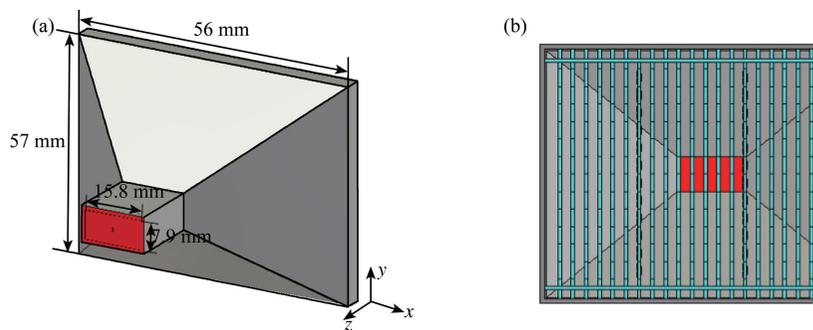


图4 加载惠更斯超表面的透镜天线(a) 加载惠更斯超表面的透镜天线结构;(b) 惠更斯超表面透镜

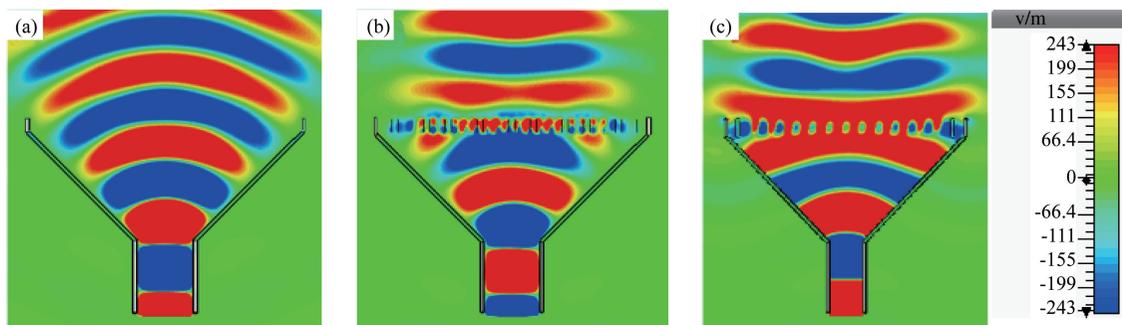


图5 15 GHz处,未加载透镜和加载透镜情况下喇叭天线中的场分布(a) 喇叭天线电场分布;(b) 透镜天线 xoz 面电场分布;(c) 透镜天线 yoz 面电场分布

3 天线加工实测

为了进一步证实天线的性能,我们对所设计的天线进行了加工,实物图如图6所示.利用矢量网络分析仪测量透镜天线的 S_{11} 参数,并与仿真结果进行对比,如图7所示.从图7中可以看出,测试结果与仿真结果吻合较好,且在13-17 GHz的频带范围内,天线的 S_{11} 小于 -10 dB.进一步观察发现,测量的谐振点向低频端偏移(仿真结果在17.5 GHz处存在一谐振点,图中没给出).产生这一现象的原因主要归结于3方面:(1) 天线和透镜的加工误差;(2) 透镜的装配误差;(3) 测量误差.而且,上述误差在高频段会更加明显,因此高频端谐振频率的偏移大于低频段.

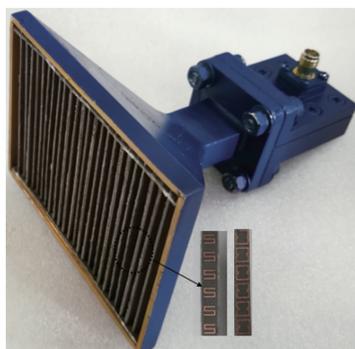


图6 透镜天线实物图

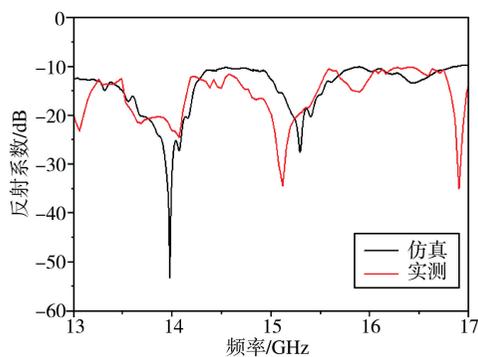


图7 透镜天线反射系数仿真与实测对比

天线的辐射特性在微波暗室中进行测试.图8为15 GHz处,仿真和测试所得到的E面和H面的远场方向图.可以看出,实测与仿真结果吻合良好.图9为未加载透镜和加载透镜后,天线的增益对比.由图可知,在13.2-16.6 GHz的宽频带范围内,相比于未加载透镜的喇叭天线,透镜天线的增益有了明显提升,平均增加了3.62 dB,且天线的最高增益达18.7 dB.为了进一步证实本天线的性能,我们将其与已有超表面透镜天线的性能进行了对比,如表2所示.通过比较发现,我们提出的惠更斯超表面单元的透射系数大于0.85,且天线的相对带宽为22.82%,其性能明显优于其它天线.

通过研究发现,尽管惠更斯超表面具有较好的工作性能,但是为了能同时产生电谐振和磁谐振,需要让

电磁波的传播方向与超表面单元平行,因此惠更斯超表面通常是由相互平行的分离结构组成,这给装配带来了困难,如图 6 中的装配方式具有较大的误差. 尤其在高频段,这一问题会变得更加突出. 为了解决这一问题,我们在未来的研究中改变惠更斯超表面的构成方式,如采用多层结构,利用层间的电磁耦合产生磁谐振、利用同层单元结构产生电谐振,这样就可以保证在电磁波垂直入射到超表面的情况下同时产生电谐振和磁谐振. 从而将惠更斯超表面设计成一个整体,以解决加工和组装的难题.

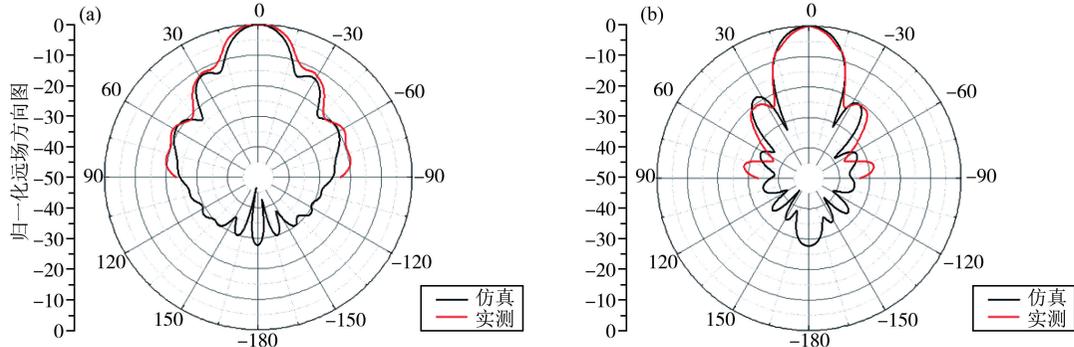


图 8 透镜天线的归一化远场方向图(a) E 面; (b) H 面

表 2 与已有透镜天线的性能对比

参考文献	中心频率/GHz	单元的透射系数	相对带宽/%	增益最大值/dB
[4]	14	0.8	13.9	20.7
[16]	10	0.8	20	18.4
[17]	10	0.7	3	16.7
本工作	15	0.85	22.82	18.7

4 结论

本文提出了一种新型惠更斯超表面,通过调节单元结构参数,该惠更斯超表面能够实现全相位覆盖和较高的透射系数. 基于这一特性,进一步设计了一种超表面透镜,透镜的焦距为 35 mm. 将所设计的透镜加载到喇叭天线上,在宽频带范围内有效提高了天线的增益. 仿真和实测结果表明,在 13.2-16.6 GHz 的频带范围内,天线的 S 参数小于 -10 dB,最大增益达到 18.7 dB. 与不加载透镜的喇叭天线相比,天线的增益得到显著提高,平均提高 3.62 dB.

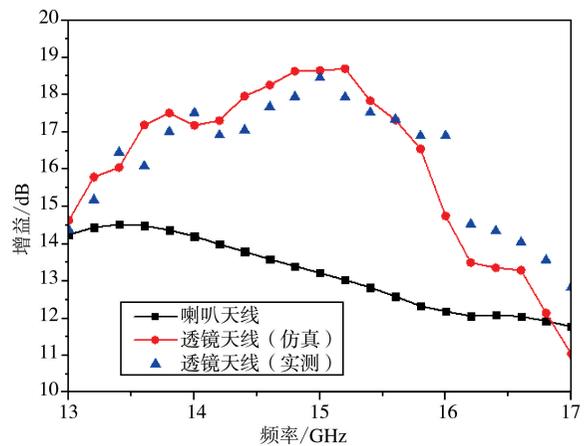


图 9 透镜天线与普通喇叭天线的增益对比

参 考 文 献

- [1] John D Kraus, RonaldJ Marhefka. 天线 [M]. 3 版. 北京:电子工业出版社,2006.
- [2] Kock W E. Metal-Lens Antenna [J]. Proceedings of the I R E and Waves and Electrons,1946,11(16):828-836.
- [3] Wang L J,Chen Q H, Yu F L, et al. High-performance lens antenna using high refractive index metamaterials [J]. Chinese Physics B, 2018,27(8):087802.
- [4] Liu K Y,Wang G M,Cai T, et al. Ultra-thin circularly polarized lens antenna based on single-layered transparent metasurface [J]. Chinese Physics B,2018,27(8):084101.
- [5] Pfeiffer C,Grbic A. Metamaterial Huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets[J]. Phys Rev Lett,2013,110 (19) : 197401.
- [6] Selvanayagam M, Eleftheriades G V. Discontinuous electromagnetic fields using orthogonal electric and magnetic currents for wavefront manipulation [J]. Opt Express, 2013,21(12):14409-14429.

- [7] Wong J P S, Selvanayagam M, Eleftheriades G V. Design of unit cells and demonstration of methods for synthesizing Huygens metasurfaces [J]. *Photon Nanostr.*, 2014, 12(4): 360-375.
- [8] Chen M, Kim M, Wong A M H, et al. Huygens' metasurfaces from microwaves to optics: a review [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(6): 1207-1212.
- [9] Chen K, Feng Y, Monticone F, et al. A reconfigurable active Huygens' metalens [J]. *Adv Mater.*, 2017, 29(17), 1606422.
- [10] Jia S L, Wan X, Fu X J, et al. Low-reflection beam refractions by ultrathin Huygens metasurface [J]. *Aip Adv.*, 2015, 5(6) 067102.
- [11] Guan C S, Wang Z C, Ding X M, et al. Coding Huygens' metasurface for enhanced quality holographic imaging [J]. *Opt Express*, 2019, 27(5): 7108-7119.
- [12] Sun Z W, Si Ma B Y, Zhao J M, et al. Electromagnetic polarization conversion based on Huygen's metasurface with coupled electric and magnetic resonances [J]. *Opt Express*, 2019, 27(8): 11006-11017.
- [13] Wong J P S, Selvanayagam M, Eleftheriades G V. Polarization considerations for scalar Huygens' metasurfaces and characterization for 2-D refraction [J]. *IEEE Trans Microw Theory Techn*, 2015, 63(3): 913-924.
- [14] Jia S L, Wan X, Bao D, et al. Independent controls of orthogonally polarized transmitted waves using a Huygens metasurface [J]. *Laser Photon Rev*, 2015, 9(5): 545-553.
- [15] Chen M, Epstein A, Eleftheriades G V. Design and experimental verification of a passive Huygens' metasurface lens for gain enhancement of frequency-scanning slotted-waveguide antennas [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(7): 4678-4692.
- [16] Zhang D, Yang X Q, Su P Q, et al. Design of single-layer high-efficiency transmitting phase-gradient metasurface and high gain antenna [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(49): 113787.
- [17] Li H, Wang G, Liang J, et al. Single-layer focusing gradient metasurface for ultrathin planar lens antenna application [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(3): 1452-1457.

High Gain Lens Antenna Based on Huygens Metasurface

MA Bin WU Xiong-bin TANG Li-guang GAO Xi

(School of Information and Communication Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract We proposed a novel Huygens metasurface, whose unit cell consists of an "S" shaped line and two open resonant rings that are etched on both sides of F4B substrate. Simulation results reveal that the proposed Huygens metasurface can realize the phase coverage of 0° to 360° and obtain the transmission coefficient up to 0.85. Based on this property, we further design a lens and loaded it on the aperture of a horn antenna. By employing the metasurface-based lens, the spherical waves at the aperture of horn antenna can be converted into plane waves and then significantly improve the antenna gain. Simulation and experimental results show that in the frequency range of 13.2 to 16.6 GHz (relative bandwidth 22.82%), the S_{11} is less than -10 dB, the antenna gain in this frequency range is increased by an average value of 3.62 dB, and the highest gain approaches 18.7 dB.

Key words lens antenna; Huygens metasurface; high gain