

具有梯度相位的高效宽带毫米波超表面结构

巴钟灵^{1,2,3}, 王雄^{1*}

¹上海科技大学信息科学与技术学院, 上海 201210;

²中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 设计一种具有梯度相位的高透射率宽带毫米波超表面结构, 该超表面结构在 55~75 GHz 频段内工作。该结构由 2 个介电层和 3 个金属层组成, 其中间金属层为缺口矩形环, 缺口矩形环的几何形状可以对相位进行 $0\sim 2\pi$ 范围内的调整, 实现偏振转换。具有不同缺口矩形环的结构单元的透射相位差在工作频段内基本保持不变, 从而保证了其宽带特性。栅格层的作用是使超表面结构具有高透射性能。所设计的透射超表面结构已成功应用于平面透镜及轨道角动量波束的超表面设计中。

关键词 材料; 梯度相位; 高透射率; 超表面; 毫米波

中图分类号 TB34; O441

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.181601

High-Efficiency Wideband Millimeter Wave Metasurface Structure with Gradient Phase

Ba Zhongling^{1,2,3}, Wang Xiong^{1*}

¹ School of Information Science and Technology, Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China;

² Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A high-transmittance broadband millimeter wave metasurface structure with gradient phase is presented, and the metasurface structure works in the 55-75 GHz frequency band. This proposed structure comprises two dielectric layers and three metal layers. The intermediate metal layer is notched rectangular ring which can adjust the phase in the range of $0\sim 2\pi$ by adjusting the geometry. The function of the notched rectangular ring is to achieve polarization conversion. The transmission phase difference of construction units with different notched rectangular rings basically remains unchanged in working frequency band, thereby ensuring the broadband property. The grid layer ensures the high transmission performance of the metasurface structure. The proposed metasurface structure is successfully applied to the metasurface designs of a planar lens and orbital angular momentum beam.

Key words materials; gradient phase; high transmittance; metasurface; millimeter wave

OCIS codes 160.3918; 050.2230; 050.2770; 160.1245

1 引言

超表面是超材料结构的一种二维形式, 本质上可以看作是在一个平面上周期性分布很多电性小尺度的散射体, 每一个散射体称为单元结构^[1]。与超材料相似, 超表面同样可以通过调节单元结构或尺

寸来控制二维材料的磁导率和介电常数等电磁参数。与超材料相比, 超表面具有物理尺寸更小、制造更简便、损耗更低等优势, 因此, 超表面可以在很多应用领域替代体积庞大的三维超材料结构, 并且可以衍生出多种新型应用, 如偏振转换器^[2-3]、吸波器^[4-5]、平面透镜^[6]、波束反射器^[7]、相位板^[8]、涡旋

收稿日期: 2019-02-25; 修回日期: 2019-03-25; 录用日期: 2019-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(61701305)、上海市浦江人才计划(17PJ1406600)

* E-mail: wangxiong@shanghaitech.edu.cn

波发生器^[9-12]和全息成像^[13]等。

梯度相位超表面是指一组可以使入射电磁波的相位发生突变的亚波长尺寸的超表面结构,其可以使反射波或透射波的传播方向发生折射或偏移。此概念最早由哈佛大学的 Yu 等^[14]提出,并实现了光频段的奇异反射和折射,颠覆了传统的斯奈尔折射定律,同时指出相位不连续结构作为复杂光束设计工具的巨大灵活性,及在转换集成光学和新型平面光学元件等方面的重要意义。相应地,在毫米波段工作的梯度相位超表面也有着广泛而重要的应用前景。

本文提出一种工作在 55~75 GHz 毫米波频段的宽带超表面结构单元,并基于这种单元结构设计了平面透镜及轨道角动量(OAM)波束发生器。介绍高透射率宽带超表面结构单元的设计机理,研究以缺口矩形环为核心的结构单元,并采取在单元结构的两边各加一层栅格的方法来提高单元结构的透射率,最后对利用这种单元结构设计两个面积为 75 mm×75 mm 的超表面进行仿真验证,用于透镜和 OAM 波束的实现。

2 超表面单元结构设计

透射型超表面单元结构的几何形状如图 1 所示,整个单元结构由层叠的 3 个金属层和 2 个介电层组成。介电层的材料是 F4B,相对介电常数为 2.2,损耗角正切为 0.002。单元结构的长度和宽度 L 均为 1.5 mm,2 层介质厚度 h 为 2.2 mm,3 层金属由金属铜制成,其厚度均为 0.035 mm。中间层的金属为缺口矩形环结构,其外长度 L_1 为 1.2 mm,内长度 L_2 为 1 mm。两层金属栅格互相垂直,金属条长度与单元结构长宽相等(1.5 mm),宽度 w 为 0.15 mm,两个金属条之间的间距同为 w 。中间层的缺口矩形环结构主要通过调整缺口的大小对透射电磁波的相位进行调制,实现宽频带内的多组不连续相位,即梯度相位。缺口金属环同时还有极化转换的功能,即 x 或 y 方向偏振的入射波在通过缺口金属环后会转换成 y 或 x 方向偏振的出射波。极化转换对于降低入射波对出射波的干扰有很大帮助,由于中间金属层的极化转换效果,上下两层金属光栅必须被设置成相互垂直的结构,使电磁波的透射效率最大化。金属光栅允许垂直于光栅的偏振波通过,同时反射平行于光栅的偏振波^[15],因此透射型超表面单元结构允许 y 偏振光波的入射及 x 偏振光波的出射。这两个正交的光栅层之所以能提高整体超表面结构的透射效率是因为类法布里-珀罗

共振^[15]作用。

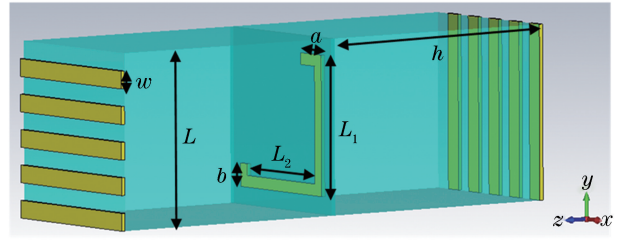


图 1 单元结构图

Fig. 1 Diagram of unit structure

实现梯度相位需要获得 $0\sim 2\pi$ 整个区间上的相位变化,主要是在其他参数固定的情况下改变参数 a 和 b 及整体金属环的旋转角度。实际中最高效的途径是利用计算机仿真软件 CST Microwave Studio 来扫描并优化 a 和 b ,在 z 方向上的两个端口使用 floquet 端口, x 和 y 方向上的边界全部使用周期性边界条件,获得在 55~75 GHz 宽带范围内透射系数与 a 和 b 之间的关系,之后将金属环旋转不同角度,获得角度与透射系数之间的关系。

设计 16 个不同的超表面单元结构,其对透射波的相位变化范围为 $0\sim 360^\circ$,并且在整个 20 GHz 的频段内相邻两个单元结构的相位差均保持在 22.5° 左右,能够实现良好的宽带梯度相位性能,有助于生成具有聚焦性能的平面透镜及具有相位特性的 OAM 波束超表面。16 个金属环单元结构如图 2 所示,对应的尺寸信息如表 1 所示。

仿真得到的 16 个表面单元结构的透射幅度和相位特性如图 3 所示,从中可以看出这 16 个单元结构呈现均匀的线性梯度变化,并且工作带宽为 55~75 GHz。同时,16 个单元结构在该带宽范围内都具有很好的透射率,绝大多数幅值都高于 0.8。仿真结果很好地证明了梯度相位单元结构的性能,可用于构建透射型毫米波超表面元件。

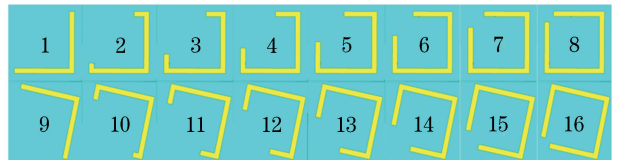


图 2 16 个中间层金属结构

Fig. 2 Structure of 16 intermediate layers of metal

3 透射型梯度相位结构的应用

3.1 平面透镜

高效聚焦和准直电磁辐射的能力对于毫米波技

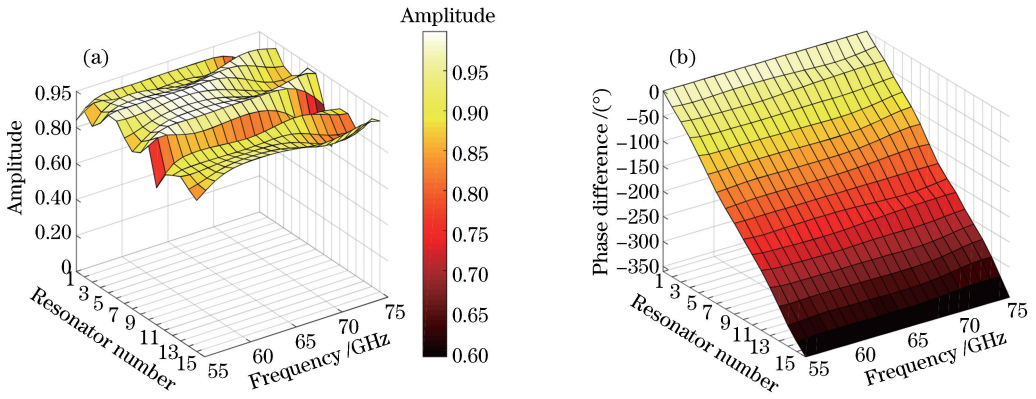


图3 16个单元结构在工作频段上的透射幅值及相位差图。(a)透射幅值;(b)相位差

Fig. 3 Transmission amplitude and phase difference of 16 unit structures in working frequency band.

(a) Transmission amplitude; (b) phase difference

表1 单元结构详细尺寸

Table 1 Detailed dimensions of unit structures

Resonator number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
a /mm	0.10	0.20	0.37	0.49	0.61	0.73	0.89	0.99	0.1	0.2	0.37	0.49	0.61	0.73	0.89	0.99
b /mm	0.10	0.30	0.38	0.50	0.64	0.79	0.89	1.02	0.1	0.3	0.38	0.5	0.64	0.79	0.89	1.02
Counterclockwise angle /($^{\circ}$)	0	0	0	0	0	0	0	0	78	78	78	78	78	78	78	78

术的诸多应用至关重要。对于成像的应用,聚焦有益于提供足够的分辨率;对于通信的应用,波束准直装置可以实现高天线的增益及信号强度的增强。一般来说,平面型器件在系统集成中更受关注,可使整体系统更加紧凑。因此,梯度相位超表面构成的高效平面透镜对发展相关应用十分重要。

为使超表面工作原理与焦距为 F 的透镜一致,超表面单元结构相位排布^[6]为

$$\varphi(r) = k_0(\sqrt{F^2 + r^2} - F), \quad (1)$$

式中, $\varphi(r)$ 为平面透镜超表面各位置处的相位值, k_0 为自由空间波数, F 为焦距, r 为超表面各处位置距超表面中心的距离。该超表面的相位分布可以依据(1)式,计算位置 r 处的相位,然后通过表1映射到16个梯度相位结构单元中最接近的相位值,需要注意的是,这里的相位均被折算到 $0 \sim 2\pi$ 范围内。(1)式产生的超表面结构布局如图4所示。

依照图4的相位排布,仿真中设置的超表面由 50×50 单位结构组成,长宽均为 75 mm。为方便计算,采用频率为 60 GHz 来计算自由空间波数 k_0 , 焦距 F 设置为 100 mm, 距超表面 50 mm 处的平面波作为仿真源。仿真的超表面栅格方向与图1中单元结构朝向一致,入射波是 y 偏振,出射波是 x 偏振。

该仿真中,在透射传输方向上距超表面100 mm

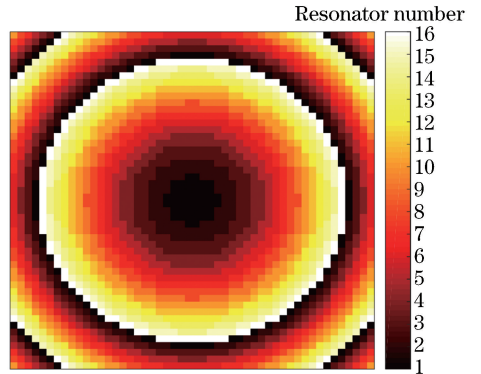


图4 用于生成平面透镜的单元结构分布图

Fig. 4 Distribution of unit structures used to generate planar lens

(聚焦点,在 60 GHz 时约为 20λ 处, λ 为 60 GHz 对应的波长)处和平行于传输方向上分别设置了场监视器。根据仿真得到的三个频率下(55, 60, 75) GHz 的方向图(图5)、距超表面 100 mm 处的电场幅度图(图6)及平行于传输方向上电场幅度图(图7),可以清楚地发现所设计的单元结构构成的平面透镜具有良好的宽带聚焦特性。同时从图6和图7可以发现,随着频率的增大,聚焦的光斑会逐渐远离超表面,而且在聚焦中心频率 60 GHz 下的会聚光斑尺寸最大,光斑的位置也在设计的聚焦点 100 mm 处附近。

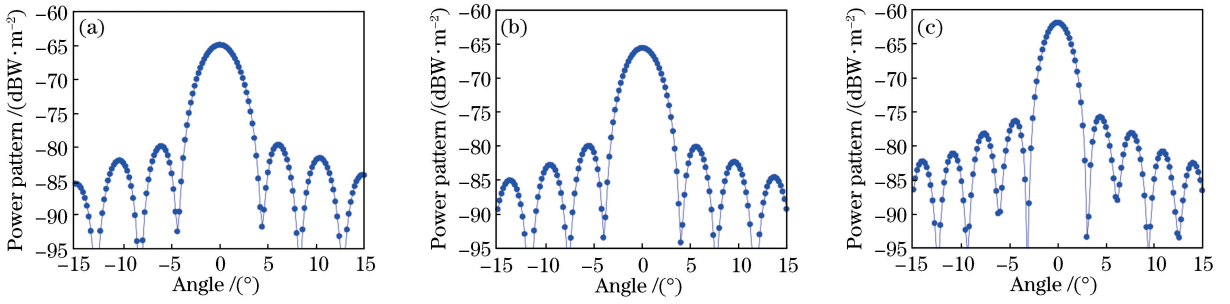


图 5 不同频率下的平面透镜二维方向图。(a) 55 GHz;(b) 60 GHz;(c) 75 GHz

Fig. 5 2D orientation diagrams of plane lens with different frequencies. (a) 55 GHz; (b) 60 GHz; (c) 75 GHz

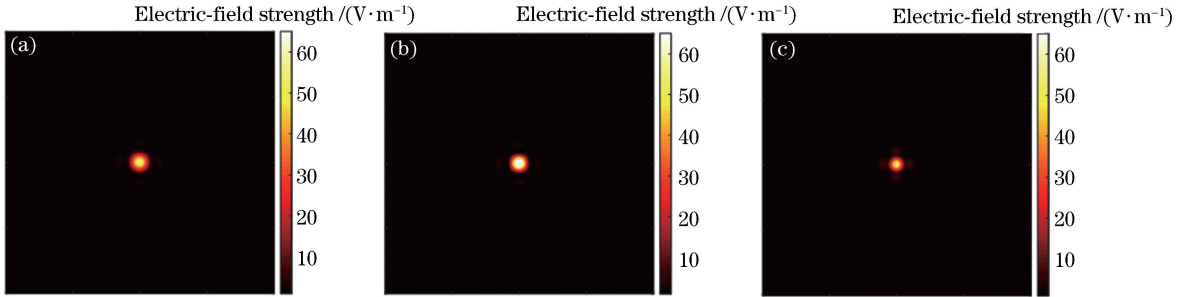


图 6 不同频率下的传播方向截面图。(a) 55 GHz;(b) 60 GHz;(c) 75 GHz

Fig. 6 Cross-sectional views in propagation direction with different frequencies. (a) 55 GHz; (b) 60 GHz; (c) 75 GHz

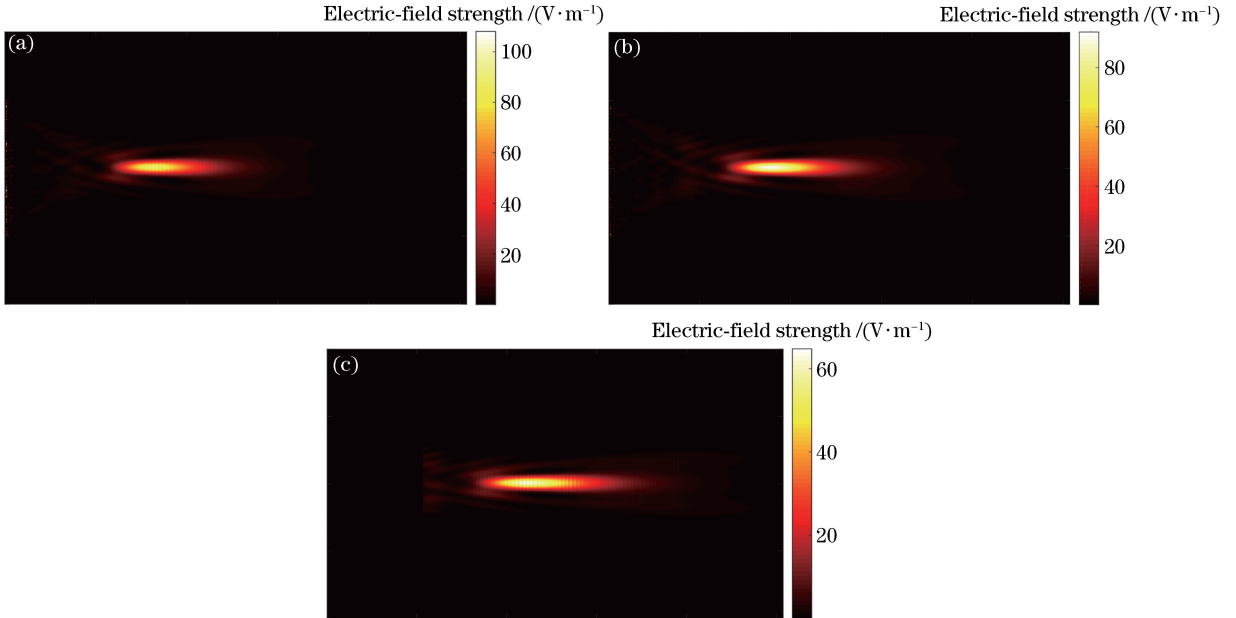


图 7 不同频率下的平行于传播方向截面图。(a) 55 GHz;(b) 60 GHz;(c) 75 GHz

Fig. 7 Cross-sectional views parallel to propagation direction with different frequencies.

(a) 55 GHz; (b) 60 GHz; (c) 75 GHz

3.2 轨道角动量波束发生器

OAM 波束,是指等相面呈螺旋状的电磁波,因为中心幅度为零且是相位奇点,也叫涡旋电磁波。与平面波相比,OAM 波的波前具有 $2\pi m$ 相移的螺旋分布,其中 m 是 OAM 的模式数,可以是任何正整数或负整数甚至是分数。OAM 波的独特性质是

OAM 不同模式间彼此正交,即由不同 OAM 模式的电磁波所携带的信息及能量可以在同一个空间信道中互不干扰地传播,这使得不同 OAM 模式可以被用来进行多路复用,因此可以在不占用额外的频谱资源的条件下显著增加信道容量^[16],在近年来成为一个重要的研究方向。与传统方法相比,利用超

表面来产生 OAM 波具有平面型结构、发散角小、反射少、结构紧凑等优势。

OAM 波的相位分布应满足的公式^[14]为

$$\phi = m \times \arctan(x/y), \quad (2)$$

式中, x 和 y 是超表面上以中心点为原点的笛卡尔坐标。携带 OAM 的电磁波的相位变化理论上是连续的, 但是对具有梯度相位的 16 个超表面结构单元中的 8 个奇数单元结构利用离散相位单元可以方便地实现 OAM 波束^[14]。两两相邻奇数单元结构之间相位差为 45° 。因此, 基于单元结构, 将超表面单元结构按图 8 所示的相位分布进行排布^[14]。这里设计的 OAM 波束的模式为 +1。

对基于(2)式设计的 OAM 超表面发生器作仿真研究, 建立一个 50×50 单位结构组成的超表面来产生 OAM 波。相位为根据图 8 中描绘的 OAM 波超表面的离散分布。距离超表面 100 mm 的圆形波导为发射天线作为激励源, 用以产生照射 OAM 波超表面的电磁波。同样, 仿真的超表面栅格方向与

图 1 中单元结构朝向一致, 入射波是 y 偏振, 出射波是 x 偏振。

该仿真中, 在透射传输方向上距超表面 200 mm (在 65 GHz 时约为 40λ) 处设置了场监视器。根据图 9 所示的仿真结果, 可以清楚地看到在整个设计频段内, 螺旋相位分布的主要特征, 即其逆时针旋转

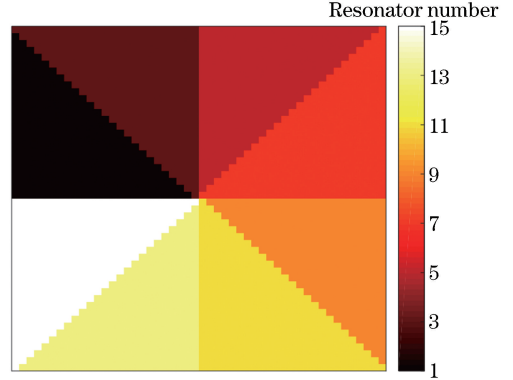


图 8 用于生成 OAM 波的单元结构分布图

Fig. 8 Unit structure distribution for generating OAM wave

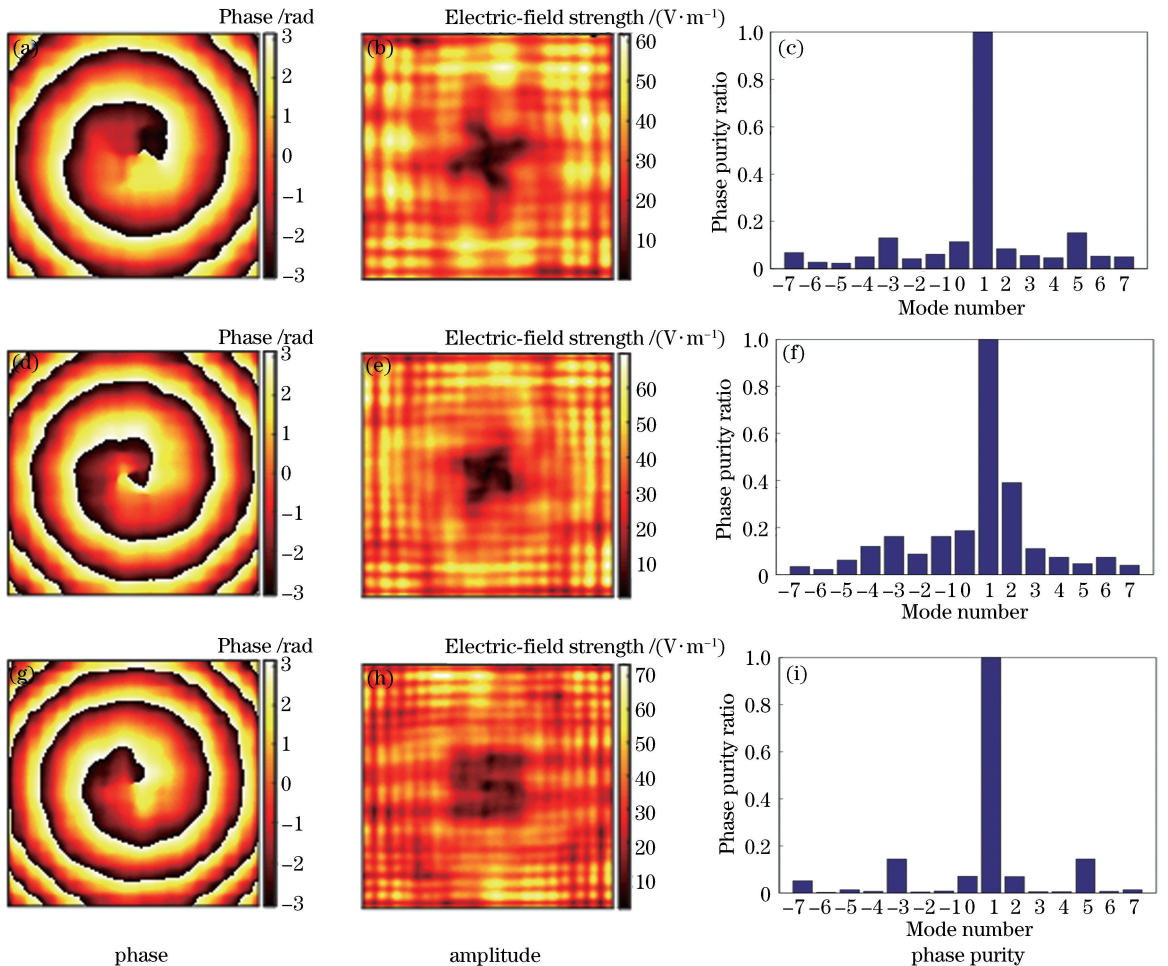


图 9 不同频率下的相位图、幅值图、相位纯度图。(a)~(c) 55 GHz; (d)~(f) 65 GHz; (h)~(j) 75 GHz
Fig. 9 Phase diagrams, amplitude maps, and phase purity plots with different frequencies. (a)-(c) 55 GHz; (d)-(f) 65 GHz; (h)-(j) 75 GHz

的相位变化。同时,可以清楚地看到振幅图中心处的相位奇点,也即理论上的振幅零点,这是 OAM 波的特性。通过计算将产生 OAM 波束的相位模式谱^[17]用于分析 OAM 波束的模式纯度,可以发现所选的 3 个频率下模式谱的纯度很高,证明产生的 OAM 波束可以在很宽的毫米波频段内工作,具有良好的宽带质量。

4 结 论

提出一种透射型宽带毫米波高效超表面梯度相位结构,并介绍了该结构的设计方法和工作原理,通过仿真,很好地验证了该毫米波单元结构的高透射率及宽带特性。并基于此种结构构建了两种毫米波频段的超表面应用,即平面透镜和轨道角动量波束发生器,通过仿真验证了两种应用的效果,证明该设计的有效性,该设计在其他相关领域中具有很好的前景。

参 考 文 献

- [1] Holloway C L, Kuester E F, Gordon J A, *et al.* An overview of the theory and applications of metasurfaces: the two-dimensional equivalents of metamaterials[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2012, 54(2): 10-35.
- [2] Zhou L, Zhao G Z, Li Y H. Broadband terahertz polarization converter based on L-shaped metamaterial[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 041602.
周璐, 赵国忠, 李永花. 基于 L 形超材料的太赫兹宽带偏振转换器[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 041602.
- [3] Cao J G, Zhou Y X. Polarization modulation of terahertz wave by graphene metamaterial with grating structure[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 092501.
曹建国, 周译玄. 栅状结构石墨烯超材料的太赫兹波偏振调制[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 092501.
- [4] Yang J, Zhang H F, Zhang H, *et al.* Ultra-broadband absorber based on plasma metamaterials [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 091602.
杨靖, 章海锋, 张浩, 等. 基于等离子体超材料的超宽带吸波体设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 091602.
- [5] Hao H G, Ding T Y, Luo W, *et al.* Design of novel broadband microwave absorber based on metamaterials [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 061604.
郝宏刚, 丁天玉, 罗伟, 等. 基于超材料的新型宽带微波吸波器设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 061604.
- [6] Aieta F, Genevet P, Kats M A, *et al.* Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(9): 4932-4936.
- [7] Neu J, Beigang R, Rahm M. Metamaterial-based gradient index beam steerers for terahertz radiation [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(4): 041109.
- [8] Pors A, Bozhevolnyi S I. Efficient and broadband quarter-wave plates by gap-plasmon resonators [J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 2942-2952.
- [9] Karimi E, Schulz S A, de Leon I, *et al.* Generating optical orbital angular momentum at visible wavelengths using a plasmonic metasurface [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(5): e167.
- [10] Bi F, Ba Z L, Wang X. Metasurface-based broadband orbital angular momentum generator in millimeter wave region [J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 25693-25705.
- [11] Ba Z L, Wang X. Metasurface for generating high-order millimeter wave orbital angular momentum beams [C]//2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium-China (ACES), July 29-August 1, 2018, Beijing, China. New York: IEEE, 2018: 18546861.
- [12] Ba Z L, Wang X. A transmission metasurface for generating high-efficiency broadband millimeter wave OAM beams [C]//The 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2019), March 31-April 5, 2019, Krakow, Poland. New York: IEEE, 2019: 1-4.
- [13] Wen D D, Yue F Y, Li G X, *et al.* Helicity multiplexed broadband metasurface holograms [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8241.
- [14] Yu N, Genevet P, Kats M A, *et al.* Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [15] Chen H Y, Ma H, Wang J F, *et al.* Ultra-wideband transparent 90° polarization conversion metasurfaces [J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(4): 463.
- [16] Mohammadi S M, Daldorff L K S, Bergman J E S,

et al. Orbital angular momentum in radio: a system study [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(2): 565-572.

OAM beams using phased array in the microwave band [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(9): 3850-3857.

[17] Liu K, Liu H Y, Qin Y L, *et al.* Generation of