

双频段透射反射型超表面及其在阵列天线的应用

毛冲, 韩国瑞*, 耿彦峰, 张文梅

(山西大学 物理工程学院, 山西 太原 030006)

摘要: 提出一种能独立调控幅度和相位的透射反射型超表面, 能够在两个频段分别对前向波束和后向波束进行独立控制。所提出的超表面单元由三层金属和两层介质组成, 上层I型结构和下层C型环结构的取向角和开口角分别调控反射与透射的幅度与相位, 且透射与反射的极化相同, 透射模式工作在12.9~15.4 GHz, 反射模式工作在18.6~26.4 GHz。中间槽隙层消除了I型结构与C型环结构的干扰, 使其透射波束与反射波束可独立调控, 可以在所工作的频段范围内独立实现其功能。在此基础上, 设计了一块双频多焦点超透镜, 可以在指定位置形成焦点, 验证了单元幅度相位独立调控能力。最后, 设计、制作和测量了17×17的透射反射阵列天线, 通过喇叭天线进行馈电。测量结果表明, 透射阵列功能的峰值增益为19.60 dBi (1 dB增益带宽为18.69%), 反射阵列功能的峰值增益为26.60 dBi (1 dB增益带宽为26.98%)。所提出的透射反射阵列天线为在宽带范围内实现双向通信提供了新的方案。

关键词: 幅度相位独立调控; 超表面; 宽带; 双频段; 透射反射阵列天线

中图分类号: TN925

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025049

引用格式: 毛冲, 韩国瑞, 耿彦峰, 等. 双频段透射反射型超表面及其在阵列天线的应用[J]. 测试技术学报, 2025, 39(4): 491-498.

MAO Chong, HAN Guorui, GENG Yanfeng, et al. A dual-band reflect-transmit metasurface and application to array antenna[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(4): 491-498.

A Dual-Band Reflect-Transmit Metasurface and Application to Array Antenna

MAO Chong, HAN Guorui*, GENG Yanfeng, ZHANG Wenmei

(College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: A reflect-transmit metasurface that can independently regulate the amplitude and phase is proposed. It can independently control the forward and backward beams in each of the two frequency bands. The designed MS unit consists of three metal layers separated by two substrates. The amplitude and phase of reflection and transmission are regulated by the orientation and opening angles of the upper I-shaped patch and the lower C-shaped ring patch, respectively. The polarizations of transmission and reflection are the same. Transmission mode and reflection mode are at 12.9~15.4 GHz and 18.6~26.4 GHz, respectively. The interference between the I-shape structure and the C-shape ring structure is eliminated by the intermediate slot layer, so that the transmitted beam and the reflected beam can be independently regulated and their function can be independently realized in the range of the frequency band in which it operates. On this basis, a dual-frequency multifocal super-lens is designed and the focus can be formed at the specified position, which verifies the ability of the unit amplitude-phase independent regula-

收稿日期: 2024-09-11

作者简介: 毛冲(2000—), 男, 硕士生, 主要从事基于多波束的超表面研究。E-mail: 996882160@qq.com。

*通信作者: 韩国瑞(1977—), 男, 副教授, 博士, 主要从事射频天线研究。E-mail: han_gr@sxu.edu.cn。

tion. Finally, the reflect-transmit-array antenna of 17×17 is designed, fabricated, and measured as well as fed through a horn antenna. The measurement results show that the peak gain of the transmission array function is 19.60 dBi (1 dB gain band-width: 18.69%) and the peak gain of the reflection array function is 26.60 dBi (1 dB gain bandwidth: 26.98%). The proposed reflect-transmit-array antenna provides a new solution to achieve bidirectional communication over a wide bandwidth range.

Key words: amplitude-phase independent modulation; metasurface; wideband; dual-band; reflect-transmit-array antenna

0 引言

近年来,由于超表面具有较低轮廓和易于集成制造的优点,得到了迅速的发展,实现了许多新颖的器件和功能,包括异常折射或反射^[1-3]、雷达散射截面缩减^[4]、全息成像^[5]和聚焦超透镜^[6]。2014年,崔铁军教授团队首次提出数字编码超表面的概念,用离散的数字状态表征不同超表面单元的电磁特性,以数字化的方式实现对电磁信息的调控^[7-9]。

随着无线通信的发展,透射阵列(Transmit Array, TA)和反射阵列(Reflect-Array, RA)引起了越来越多的关注,大多数报道的TA和RA只能朝一个方向发射或反射波束,这限制了它们的潜在应用。因此,将TA和RA合并到一种设计当中已然成为研究热点。Yang等^[10]提出了一种厚度接近于零的高增益双向透射反射阵列(Transmit-Reflect-Array, TRA)天线,测得TA和RA的增益分别为25.5 dBi和25 dBi,这种设计的透射波束和反射波束无法独立控制;Cai等^[11]提出了一种多层TRA天线,可以独立控制反射波束和透射波束,1 dB增益带宽为9.14%;Liu等^[12]采用稀疏阵列方法设计的TRA天线,阵列由透射单元和反射单元组成,可以独立控制透射波束和反射波束,透射和反射的1 dB增益带宽分别为6.7%和9.3%。上述所提出的TRA天线分别存在波束无法独立调控、带宽较窄和增益较低的问题。

针对上述问题,本文提出了一种幅度相位独立调控的双频透射反射型超表面,并基于此超表面单元,设计了一种宽带透射反射阵列天线。所设计的超表面单元仅由三层金属和两层基板组成,顶层I型结构的取向角与开口角分别调控反射的幅度和相位,底层C型环结构的取向角与开口角分别调控透射的幅度和相位,中间槽隙层的引入有效减免了顶层与底层之间的串扰。为验证其单元的幅度相位独立调控能力,设计了一块双频

多焦点超透镜,仿真结果验证了其设计的准确性。本文设计、制作并测量了 17×17 的TRA天线,实测结果与仿真结果吻合良好,所设计的TRA天线非常适合需要双向波束的宽带无线应用。

1 单元设计与性能分析

1.1 结构设计

图1为超表面单元的结构图,超表面单元由三层金属和两层介质(F4B, $\epsilon=2.2$, $\tan \sigma=0.002$)组成。其中,顶层的金属层为I型结构,底层的金属层为C型环结构,相应的外半径、内半径、取向角和开口角分别表示为 $(R_3, R_4, \alpha_2, \beta_2)$ 和 $(R_1, R_2, \alpha_1, \beta_1)$ 。

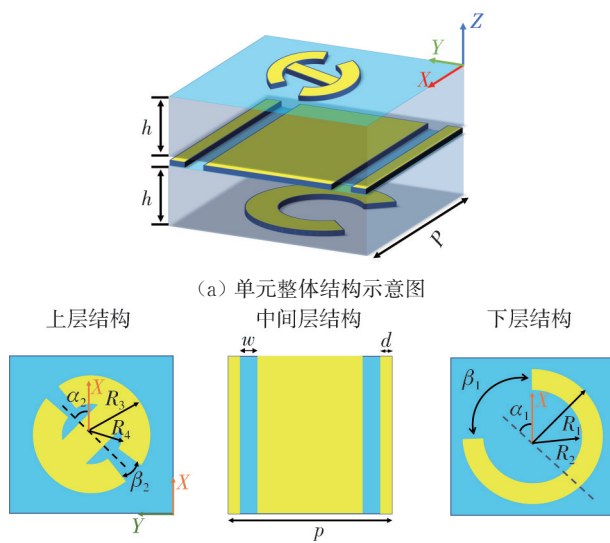


图1 单元结构示意图

Fig. 1 Unit cell of the structure

中间的金属层为槽隙层,沿 x 方向有两条矩形缝隙,I型结构与C型环结构作为极化转换单元,当 y 极化波入射时,分别在两个频段将 y 极化波转换为 x 极化波,同时,槽隙层可以有效减小或消除上层I型结构与下层C型环结构之间的干扰,如图2所示,在14 GHz处,表面电流主要集中在底层的C型环结构上,在22 GHz处,表面电流主要集中在顶层的I型

结构。角度 $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2$ 和 β_2 为变化参数, 其他几何参数固定为: $p=7\text{ mm}, h=2\text{ mm}, w=0.75\text{ mm}, d=0.5\text{ mm}, R_1=3\text{ mm}, R_2=2.4\text{ mm}, R_3=2.2\text{ mm}, R_4=1.1\text{ mm}$ 。

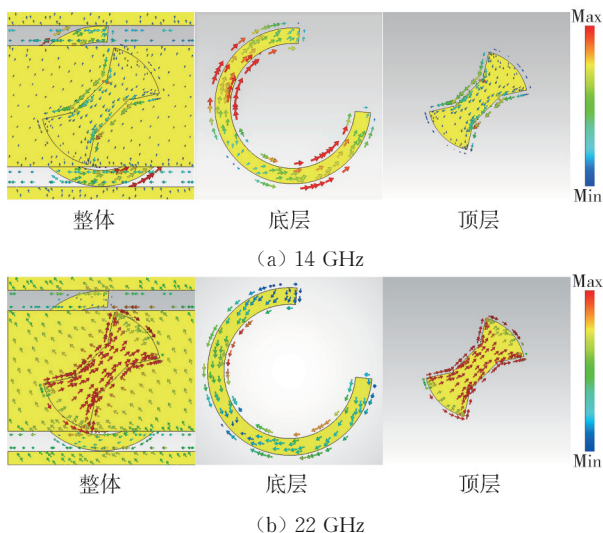


图 2 超表面单元表面电流图

Fig. 2 Surface current map of metasurface unit

1.2 单元分析

反射相位采用 3 bit 编码, 相邻单元之间的相位差为 45° , 透射相位采用 2 bit 编码, 相邻单元之间的相位差为 90° , 具体参数如表 1 与表 2 所示。利用 CST Microwave Studio 对单元结构进行全波仿真, y 极化电磁波作为入射电磁波沿 z 方向照射单元。

表 1 反射单元参数

Tab. 1 Parameter of reflection element

编码状态	000	001	010	011	100	101	110	111
$\alpha_2/(\circ)$	45	45	45	45	-45	-45	-45	-45
$\beta_2/(\circ)$	15	40	70	115	15	40	70	115

表 2 透射单元参数

Tab. 2 Parameter of transmission element

编码状态	00	01	10	11
$\alpha_1/(\circ)$	45	45	-45	-45
$\beta_1/(\circ)$	5	85	5	90

图 3 展示了反射单元的性能, 从图 3(a) 可以看出, 在 18.6~26.4 GHz 频段反射单元的幅度均在 0.9 以上, 图 3 (c) 和 (d) 给出了 α_2 变化时对反射单元幅度与相位的影响, α_2 可以对反射单元幅度进行调控且相位仅存在 8° 范围内的轻微变化。表明了通过调整 I 型结构的取向角, 可以在保持相位不变的情况下, 实现对幅度的调控。

图 4 展示了透射单元的性能, 从图 4(a) 可以看出, 在 12.9~15.4 GHz 频段透射的幅度均在 0.58 以

上, 图 4(c) 和 (d) 给出了 α_1 变化时对透射单元幅度与相位的影响, α_1 可以对透射单元幅度进行调制且相位仅存在 8° 范围内的轻微变化。

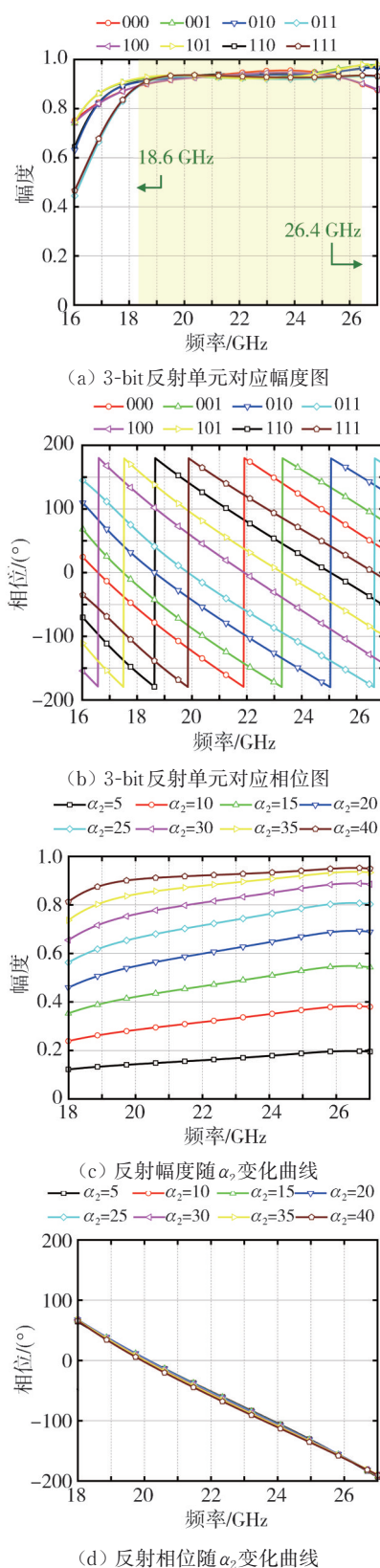


图 3 反射单元的性能

Fig. 3 Performance of reflection units

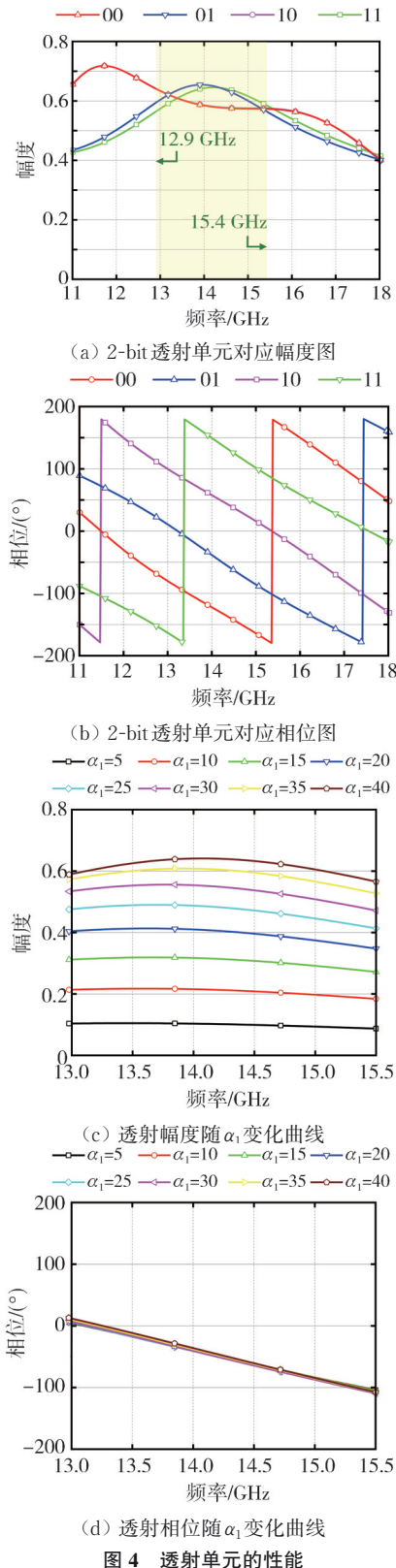


图 4 透射单元的性能

表明了通过调整C型环的取向角,可以在保持相位不变的情况下,实现对幅度的调控。

此外,还讨论了当顶层I型结构与底层C型环结构变化时,分别对透射与反射幅度和相位的影

响。如图 5(a) 所示,当 α_1 与 β_1 发生变化时,反射的幅度和相位也保持稳定,如图 5(b) 所示,当 α_2 与 β_2 发生变化时,透射幅度和相位也保持稳定。换言之,顶层I型结构与底层C型环结构之间互不影响,保证了透射与反射的独立调控。

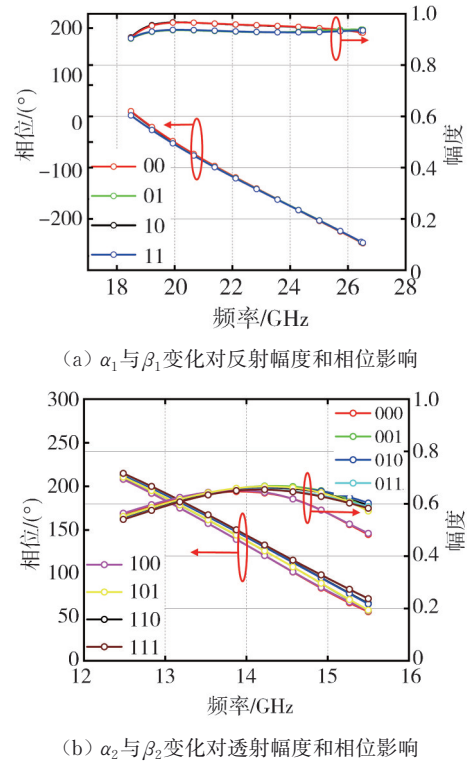


图 5 透射单元与反射单元之间的互相影响

Fig. 5 Interaction between transmissive and reflective units

1.3 双频多焦点超透镜设计

为了验证单元的幅度相位独立调控能力,设计了双频多焦点超透镜,构建的阵列由 21×21 个单元构成。其示意图如图 6 所示,在 14 GHz 透射的 x 极化波能量聚焦于后半空间 x 方向上的等距等高的双焦点,在 22 GHz 反射的 x 极化波能量聚焦于前半空间 x 方向上的等距不等高的双焦点。

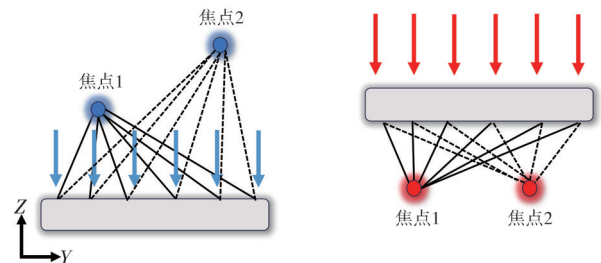


图 6 双频多焦点超透镜聚焦功能示意图

构成超透镜的幅度和相位由式(1)计算得到。

$$P(x, y) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot \exp[jk\varphi_n(x, y)] =$$

$$\sum_{n=1}^N A_n \cdot \exp\left[jk \sqrt{(x + d_{xn})^2 + (y + d_{yn})^2 + F_n^2} - F_n\right], \quad (1)$$

式中: $P(x, y)$ 为 (x, y) 处单元的复振幅; n 为焦点的序号; A_n 为第 n 个焦点的振幅; d_{xn}, d_{yn}, F_n 定义焦点的位置。在本节设计中, 反射模式下的两个焦点分别设计为 I(0, -50 mm, 50 mm) 和 II(0, 50 mm, 100 mm), 透射模式下的两个焦点分别设计为 III(0, -50 mm, -50 mm) 和 IV(0, 50 mm, -50 mm)。首先, 计算阵列顶层与底层的幅度与相位分布, 接着, 将每个幅度值归一化并离散到五级幅度调制, 最终, 顶层和底层的幅度分布、相位分布以及量化分布如图 7 所示。

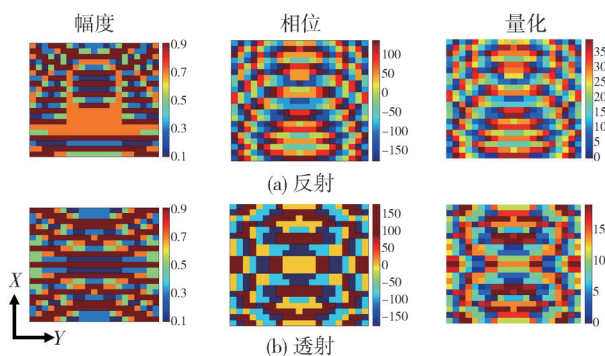


图 7 双频多焦点幅度相位分布图样及量化分布结果
Fig. 7 Dual-frequency multifocal amplitude-phase distribution pattern and quantitative distribution results

以平面波作为入射波, 并记录反射后半空间和透射前半空间的 x 极化电场。图 8 和图 9 分别为反射模式和透射模式下的 x 极化电场强度分布图, 可以观察到在 22 GHz 处出现两个等距不等高的焦点, 坐标分别为 I(0, -50 mm, 50 mm) 和 II(0, 50 mm, 100 mm), 在 14 GHz 处出现两个等距等高的焦点, 坐标分别为 III(0, -50 mm, -50 mm) 和 IV(0, 50 mm, -50 mm), 符合设计要求, 验证了该超表面单元对透射和反射幅度相位的独立调控能力。

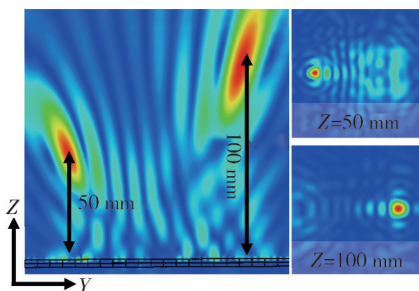


图 8 反射模式下 x 极化电场分布图(22 GHz)
Fig. 8 Distribution of x -polarised electric field in reflection mode (22 GHz)

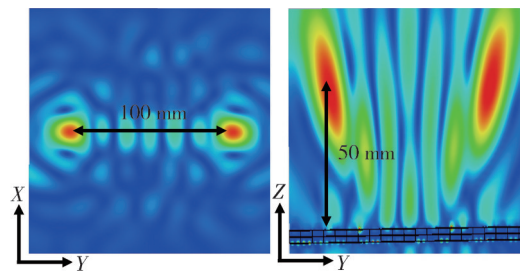


图 9 透射模式下 x 极化电场分布图(14 GHz)
Fig. 9 Distribution of x -polarised electric field in transmission mode (14 GHz)

2 TRA 天线的设计与仿真

在本节中设计了透射单波束和反射单波束偏折的 TRA 天线, 构建的阵列由 17×17 个单元组成, 总尺寸为 $119 \text{ mm} \times 119 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。将线极化喇叭天线 (LB-62-10-C-SF, 12.4~18 GHz; HD-220SGAH10+K, 17.6~26.7 GHz) 放置在距离阵列天线中心上方 85 mm 处作为馈源。由于喇叭天线发射的是球面波, 所以需要进行球面波相位补偿, 补偿相位由式(2)得到。

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{x^2 + y^2 + F^2} - F \right) \pm 2k\pi + \varphi_0 \quad (k = 0, 1, \dots), \quad (2)$$

式中: F 为焦距; λ_0 为自由空间中的波长; φ_0 为参考相位。透射波为垂直单波束, 所需编码图样为平面波相位补偿图样进行量化的图样, 反射波束为偏折的单波束, 故需要将梯度编码图样与球面波补偿相位图样进行叠加并量化, 叠加过程如图 10 所示。

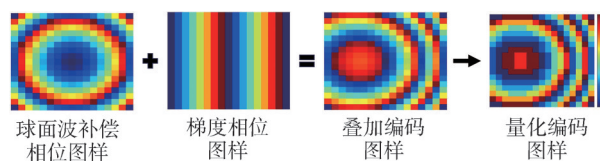


图 10 反射波束偏折相位量化过程示意图
Fig. 10 Schematic diagram of the process of quantizing the deflected phase of a reflected beam

图 11 给出了阵列天线的 3D 远场方向图, 可以清晰地观察到透射半空间产生了垂直的单波束, 反射半空间产生了偏折的单波束, 偏折的角度为

$$\theta_{\text{ref}} = \text{Sin}^{-1}\left(\frac{\lambda}{\Gamma}\right), \quad (3)$$

式中: λ 和 Γ 分别对应工作频率的波长和编码序列的周期长度。

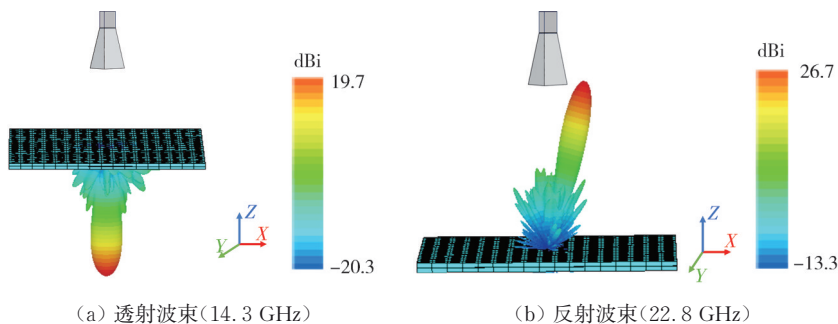


图 11 透射反射阵列天线远场方向图

Fig. 11 Far-field orientation map of the reflect-transmit-array antenna

3 实测结果与讨论

对 TRA 天线进行加工和测试，测试在微波暗

室进行，实物与测试环境如图 12 所示，发射和接收喇叭天线分别接到矢量网络分析仪的两个端口。

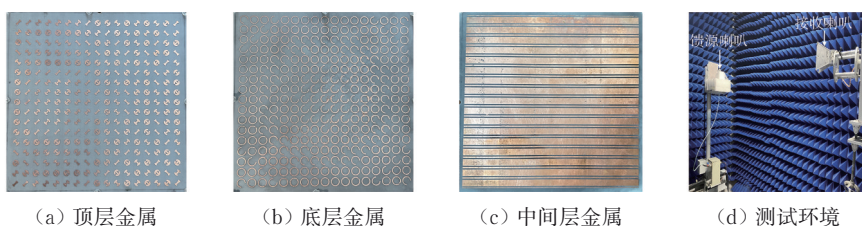


图 12 TRA 实物图以及远场测试环境

Fig. 12 Fabricated TRA antenna prototype and the far-field test environment

图 13 给出了 TRA 天线在 13、14 和 15 GHz 的辐射方向图和增益曲线图，从图中可以得到，透射波束在其工作频段内，波束稳定在 0° 方向，TA

功能的峰值增益为 19.6 dBi，口径效率为 22.57%，1 dB 增益带宽为 18.69% (13.2~15.8 GHz)。

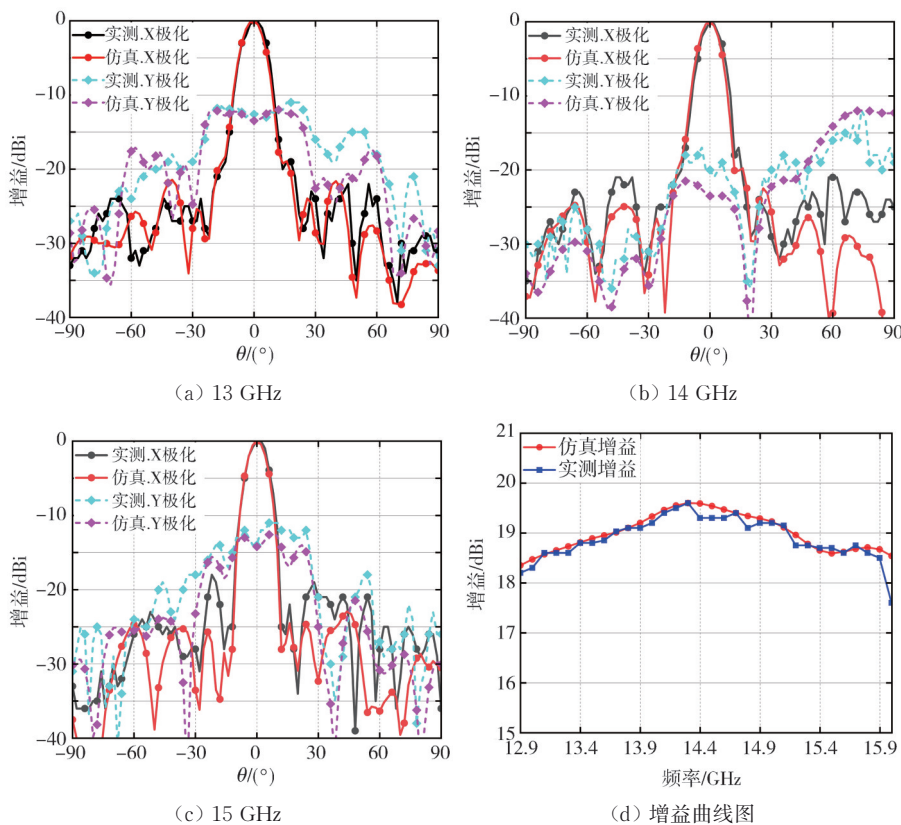


图 13 透射方向图以及增益曲线图

Fig. 13 Transmission direction graph and gain curve

图 14 给出了 TRA 天线在 19、21、23、25 和 26 GHz 的辐射方向图和增益曲线图,从图中可以得到,反射波束的偏折角度在 19 GHz 为 16°, 在 26 GHz 为 11°, 反射波束的偏转角度 θ_{ref} 随频率的增大而减小,符合理论计算,RA 功能的峰值增益为 26.6 dBi, 口径效率为 50.41%, 1 dB 增益带宽为 26.98%(20.2~26.5 GHz)。

从图 13 和图 14 可以看出,测量的辐射方向图与模拟的辐射方向图非常吻合。

表 3 列出了所提出天线与其他报道的设计之间的比较。相比于其他设计,本文所设计的 TRA 天线的 1 dB 增益带宽是所有设计中最宽的,此外,本文的 RA 峰值增益相较于其他设计较高,且口径效率更是高达 50.41%。

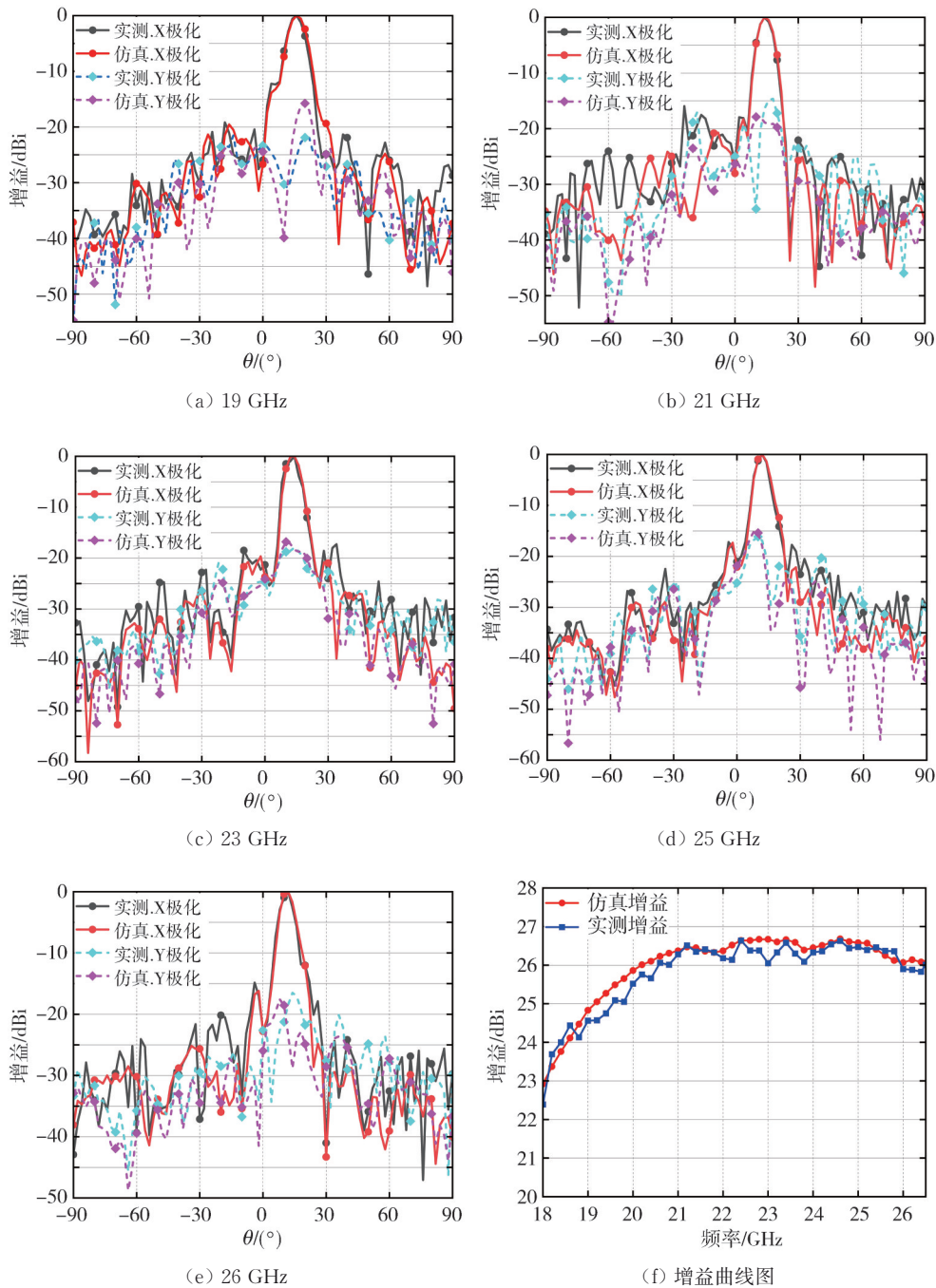


图 14 反射方向图以及增益曲线图

Fig. 14 Reflection direction diagram and gain curve

表3 设计天线与报道设计的比较

Tab. 3 Comparison of proposed antenna with reported design

来源	TA/RA 峰值增益/dBi	TA/RA 峰值口径效率/%	TA/RA 1 dB增益带宽/dB	波束独立调控	极化多样性	制造技术
文献[10]	25.5/25	15/14	15/14	否	否	激光切割
文献[11]	21.4/20	36.3/37.4	9.1/11.2	是	是	3层PCB
文献[12]	21.4/24.4	7/14	6.7/9.3	是	否	3层PCB
文献[13]	27.3/26.2	35.1/48.7	10.4/14.2	是	是	4层PCB
本文	19.6/26.6	22.57/50.41	18.69/26.98	是	否	3层PCB

4 结 论

本文提出了一种能独立调控幅度和相位的透射反射型超表面,可以在两个频段独立控制极化相同的前向波束和后向波束。通过设计的双频多焦点超透镜验证了其单元的幅度相位独立调控能力,最后,制作和测量了透射反射阵列天线,实测结果与仿真结果吻合较好。所提出的超表面应用于透射反射阵列天线,具有宽带、独立波束控制能力和低制造成本的优点,在宽带双向通信天线的应用中具有广阔的前景。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] NI X, EMANI N K, KILDISHEV A V, et al. Broad-band light bending with plasmonic nanoantennas [J]. *Science*, 2012, 335(6067): 427.
- [3] SUN S, YANG K Y, WANG C M, et al. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6223-6229.
- [4] WANG J, QU S, XU Z, et al. Super-thin cloaks based on microwave networks [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(2): 748-754.
- [5] ZHENG G, MÜHLENBERND H, KENNEY M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308-312.
- [6] KHORASANINEJAD M, CHEN W T, DEVLIN R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging [J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [7] DELLA GIOVAMPAOLA C, ENGHETA N. Digital metamaterials [J]. *Nature Materials*, 2014, 13(12): 1115-1121.
- [8] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e218.
- [9] BAO L, FU X, WU R Y, et al. Full-space manipulations of electromagnetic wavefronts at two frequencies by encoding both amplitude and phase of metasurface [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 6(4): 2001032.
- [10] YANG F, DENG R, XU S, et al. Design and experiment of a near-zero-thickness high-gain transmit-reflect-array antenna using anisotropic metasurface [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(6): 2853-2861.
- [11] CAI T, WANG G M, FU X L, et al. High-efficiency metasurface with polarization-dependent transmission and reflection properties for both reflectarray and transmitarray [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(6): 3219-3224.
- [12] LIU S L, LIN X Q, YAN Y H, et al. Generation of a high-gain bidirectional transmit-reflect-array antenna with asymmetric beams using sparse-array method [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(9): 6087-6092.
- [13] LIU X, YAN Z, WANG E, et al. Dual-band orthogonally-polarized dual-beam reflect-transmit-array with a linearly polarized feeder [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(9): 8596-8601.