

文章编号 1672-6634(2024)03-0008-06

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2023120009

高增益反射型超表面多波束双频天线设计

徐娟, 杨科心

(曲阜师范大学 网络空间安全学院, 山东 曲阜 273165)

摘要 提出了一种高增益多波束双频天线,通过超表面的电磁调控特性实现在双频段的波束聚焦和波束偏转。所设计的多波束双频天线由反射型超表面和双频微带天线两部分组成。为实现焦距为40 mm的波束聚焦和 $\pm 30^\circ$ 波束偏转,将双频微带天线放置在超表面下方40 mm的水平面上。根据天线上方相位近似于0和 π 的两个超表面单元合理排布,天线位于焦点正下方时在14.5 GHz和22.7 GHz实现了波束聚焦,天线偏离焦点 ± 35 mm处时在14.5 GHz和22.7 GHz实现了 $\pm 30^\circ$ 波束偏转。仿真结果表明,不同位置天线在双频段实现了不同的波束调控效果,相较于没有超表面时,天线低频段内增益增大了11.56~14.03 dBi,高频段内增益增大了10.74~13.07 dBi。所设计的超表面天线实现了在双频段的高增益、波束调控性能。

关键词 超表面;双频天线;电磁调控;多波束

中图分类号 TN925+92

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Design of High Gain Reflecting Metasurface Multi-beam Dual-band Antenna

XU Juan, YANG Kexin

(School of Cyber Science and Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

Abstract A high gain multi-beam dual-frequency antenna is proposed to achieve beam focusing and beam deflection in dual-frequency band by means of the electromagnetic control characteristics of metasurface. The designed multi-beam dual-frequency antenna consists of two parts: reflective metasurface and dual-frequency microstrip antenna. To achieve beam focusing with a focal length of 40 mm and $\pm 30^\circ$ beam deflection, the dual-frequency microstrip antenna is placed on a horizontal plane 40 mm below the metasurface. According to the rational arrangement of two metasurface elements whose phase is approximately 0 and π above the antenna, beam focusing is achieved at 14.5 GHz and 22.7 GHz when the antenna is directly below the focus, and $\pm 30^\circ$ beam deflection is achieved at 14.5 GHz and 22.7 GHz when the antenna is ± 35 mm away from the focus. The simulation results show that the antenna at different positions can achieve different beam control effects in the dual frequency band. Compared with the non-metasurface antenna, the gain of the antenna in the low frequency band is increased by 11.56~14.03 dBi, and the gain

收稿日期:2023-12-21

基金项目:国家自然科学基金(61701278);山东省自然科学基金(ZR2023MF038)资助

通信作者:徐娟,女,汉族,博士,副教授,研究方向:电磁场与微波技术,E-mail:xujuan125@163.com。

in the high frequency band is increased by 10.74~13.07 dBi. The designed metasurface antenna achieves high gain and beam control performance in dual frequency band.

Key words metasurface; dual-frequency antenna; electromagnetic control; multibeam

0 引言

厘米波段频率在 3~30 GHz,厘米波多波束天线在雷达系统、卫星通信以及微波通信领域得到广泛应用^[1-3]。常见的多波束天线主要为两大类:一类是利用准光学器件的多波束天线^[4,5],例如反射面天线、透镜天线,这一类天线增益高、结构简单、能实现多角度波束扫描范围,但当扫描角度逐渐增大,方向图易发生畸变。另一类是相控阵天线^[6],这一类天线基于波束成形网络,不同端口之间生成相位差,从而实现波束扫描,但当天线工作在低频时,体积变大,介质损耗增加。近年来,超表面以其灵活的电磁调控能力被广泛应用于无线通信系统中。编码超表面作为调控电磁波的重要器件之一,具有独特的电磁调控特性,将超表面单元的相位使用二进制编码表征,并按照特定的编码排布可实现对电磁波的灵活调控,可实现波束分裂^[7]、波束偏转^[8]、波束聚焦^[9]、涡旋波^[10]等各种性能,可应用于厘米波段无线通信。基于超表面的多波束天线^[11,12]具有灵活的波束扫描角度,其体积小、增益高易于实现天线小型化。文献[13]通过在微带天线上方添加不完全覆盖的超表面作为辐射器,使波束聚焦在 33°方向。通过对四个天线端口馈电,实现了俯仰角和方位角不同的四波束。但天线辐射波束宽,聚焦效果差,旁瓣高。文献[14]在天线上方引入 5×5 超表面,波束可在方位角实现大范围偏转,在馈电线路引入两个短截用于抑制天线旁瓣和改善阻抗带宽。同样通过控制天线馈电端口实现四波束。但是仍存在问题,虽然该结构尽可能的抑制旁瓣,但辐射方向图旁瓣仍然过大,并没有凸显出超表面的聚焦效果,天线增益仅 8.54 dBi。

基于超表面电磁调控特性,提出了高增益双频多波束超表面天线,经过对超表面编码排布和天线位置排布,可实现双频段波束聚焦和波束偏转性能,该多波束天线具有波束可控、高增益、高指向性等优点,可应用于 Ku 波段和 K 波段基站与多用户通信。

1 双频微带天线

设计了一种工作在两个频段的微带天线,其结构如图 1 所示,由厚度一致的三层介质基板组成,基板材料为 FR4(相对介电常数 4.4,厚度 $h=0.5$ mm)。天线由缝隙向上馈电,通过两个大小不一致的贴片向外辐射,通过调节两个辐射贴片的尺寸控制两个频点向高频 (a)

或低频移动。图 2 为两个贴片大小对 S_{11} 的影响,可以看出改变大方形辐射贴片边长 a 和小方形辐射贴片 b 高频谐振点和低频谐振点均影响较大,随着 a 的逐渐增大,谐振点逐渐向低频移动;随着 b 的逐渐减小,谐振点逐渐向高频移动。虽然随着 a 和 b 的改变阻抗带宽相差不大,但当 a 过大或 b 过小时,天线在工作频带内增益为负值。最后,在阻抗带宽和辐射方向图的综合考虑下,选择 $a=3$ mm, $b=4$ mm,图 3(a)为双频微带天线的 S_{11} ,工作频段为 14.09~14.84 GHz 及 22.27~23.11 GHz,阻抗带宽分别为 5.2%和 3.7%。14.5 GHz 和 22.7 GHz 的辐射方向图如图 3(b,c)所示,在两个频点处均朝 +z 方向辐射,最高增益分别为 2.79 dBi、4.98 dBi,交叉极化水平分别为 50 dBi、46 dBi。

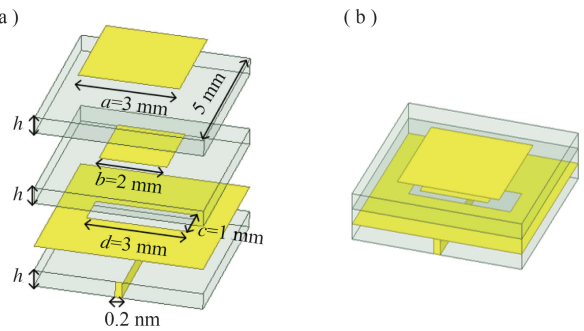


图 1 天线结构(a) 分层结构; (b) 整体结构

Fig. 1 Antenna structure (a) hierarchical structure; (b) overall structure

2 反射型超表面单元和阵列设计

反射型超表面单元结构如图 4 所示,由一层介质基板(绿色部分)、上层金属贴片(橙色部分)、下层全金属地板共三层构成,其中上层贴片形状是一个圆环包裹着中间两个对称的 T 形。为在宽频带内实现相位梯

度,介质基板采用国产聚四氟乙烯(F4B),相对介电常数为 2.65,通过控制最外圈圆环的半径 R 控制超表面相位(中间 T 形结构参数保持不变),当 $R=1.2$ mm 和 $R=2.1$ mm 时,超表面在 12~24 GHz 内实现 180° 相位差,覆盖双频天线所工作的 14.5 GHz 和 22.7 GHz,满足设计需求。使用仿真软件 HFSS 对其进行仿真,两个单元的相位和反射幅度仿真结果如图 5 所示,反射幅度高于 0.9,具有良好的反射特性。将 $R=2.1$ mm 的超表面单元标记为“0”单元, $R=1.2$ mm 的超表面单元标记为“1”单元,它们之间的相位近似于 0 和 π 。要实现对电磁波的调控,需要将“0”、“1”单元按照相位进行排布组成反射超表面阵列,其 1-bit 编码排布方法如下。

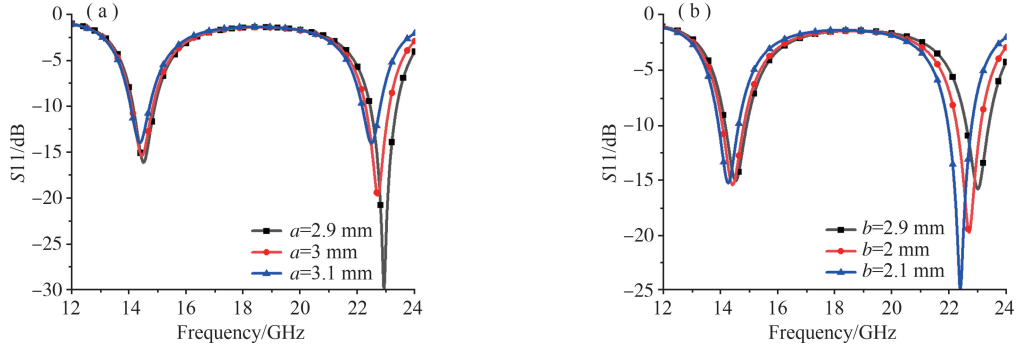


图 2 参数对 S11 的影响(a) S11 随 a 变化的曲线; (b) S11 随 b 变化的曲线

Fig. 2 Influence of parameters on S11 (a) curve of S11 changing with a ; (b) curve of S11 changing with b

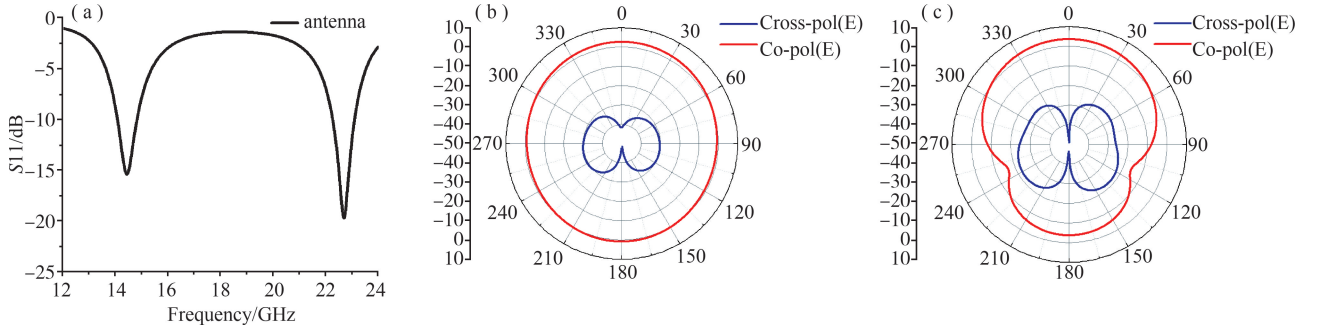


图 3 天线性能(a) S11; (b) 14.5 GHz 3D 方向图; (c) 22.7 GHz 3D 方向图

Fig. 3 Antenna performance (a) S11; (b) 14.5 GHz 3D pattern; (c) 22.7 GHz 3D pattern

假设天线的中心位置坐标为 $(0,0,0)$,反射阵上每个单元相对于天线中心的位置坐标为 (x_i, y_j, F) ,若要超表面阵列实现波束聚焦效果,那么阵列中每个单元的相位应满足

$$\varphi(x_i, y_j) = \frac{2\pi}{\lambda_0}(\sqrt{x_i^2 + y_j^2 + F^2} - F), \quad (1)$$

$$\begin{cases} 0^\circ \leq \varphi(x_i, y_j) \leq 180^\circ \rightarrow \text{“0”}, \\ 180^\circ \leq \varphi(x_i, y_j) \leq 360^\circ \rightarrow \text{“1”}, \end{cases} \quad (2)$$

其中 λ_0 为自由空间波长, F 为焦距。当天线偏离焦点时,波束方向将发生偏转,其偏转方向 (θ_0, φ_0) 满足

$$\varphi(x_i, y_j) = \frac{2\pi}{\lambda_0}[\sqrt{x_i^2 + y_j^2 + F^2} - \sin\theta_0(x_i \cos\varphi_0 + y_j \sin\varphi_0)], \quad (3)$$

由公式(1)和(2),可计算得到焦距为 40 mm 在 14.5 GHz 和 22.7 GHz 时 1-bit 编码相位分布,当焦距 $F=40$ mm 时,因频率不同,因此两个频点处的阵列相位排布不同。使用第 1 节所设计的双频微带天线作为馈源,与超表面阵列集成,为实现聚焦和偏转这两种不同的波束辐射效果,在不同位置处放置天线,其中,聚焦时天线中心与超表面阵列中心对齐,距离相差 40 mm,偏转时天线中心与超表面阵列 ± 35 mm 处对齐,焦距保持不变。超表面天线功能显示在图 6 中,14.5 GHz 和 22.7 GHz 处的阵列相位分布,如图 7 所示,由 24×24 个单元按照 1-bit 编码相位分布组成,相邻单元中心之间的距离为 5 mm,整体尺寸为 120 mm $\times$ 120 mm,与超表面集成后天线的 S11 变化不大,显示在图 8 中。

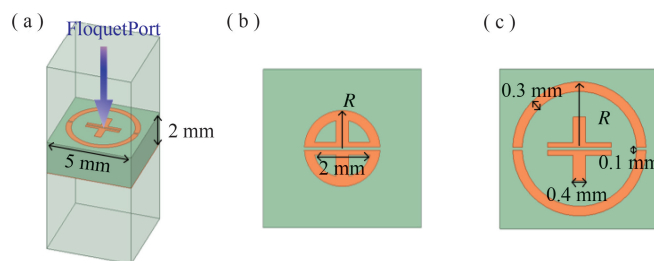


图4 超表面结构(a) 单元周期; (b) “1”单元; (c) “0”单元

Fig. 4 Metasurface structure (a) unit period; (b) “1” unit; (c) “0” unit

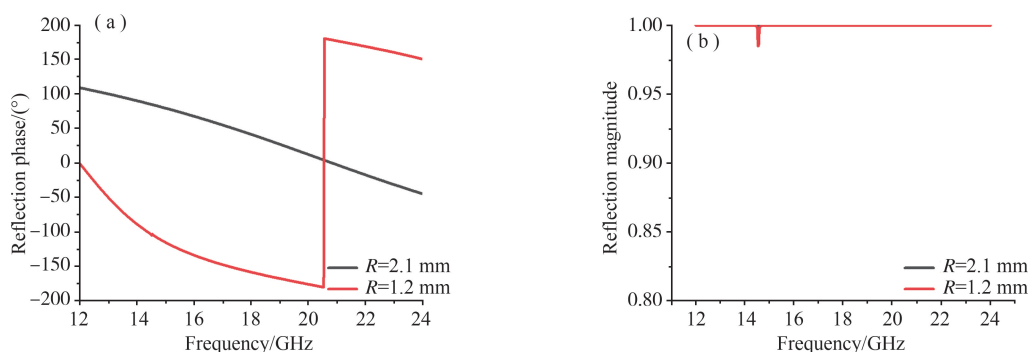


图5 超表面性能

Fig. 5 Metasurface property

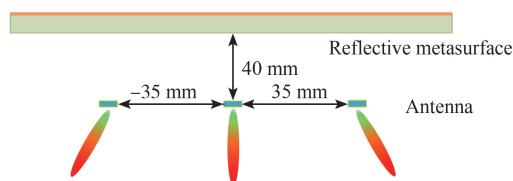


图6 双频天线波束聚焦与波束偏转原理图

Fig. 6 Principle diagram of beam focusing and beam deflection for dual frequency antenna

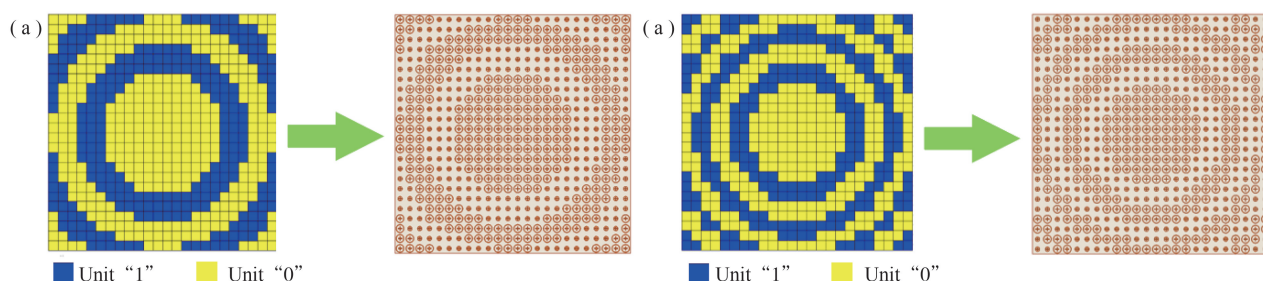


图7 1-bit 编码排布(a) 14.5 GHz; (b) 22.7 GHz

Fig. 7 1-bit coding con Figuration (a) 14.5 GHz; (b) 22.7 GHz

3 结果与分析

因天线本身朝 $+z$ 方向辐射,加入超表面阵列后辐射方向反向,现以 $180^\circ(-z$ 方向)为新的参照线。图9显示了14.5 GHz不同位置天线所实现的不同波束效果,焦点位置处天线实现了波束聚焦(指向 180°),两个偏置天线实现了 $\pm 30^\circ$ (指向 150° 、 210°)的波束偏转,其中聚焦波束最高增益16.82 dBi,偏转波束峰值增益为14.35 dBi,相对于没有超表面阵列时的微带天线,低频增益增大了11.56~14.03 dBi。图10绘制了低频三个波束的共极化和交叉极化水平,聚焦时交叉极化水平大于28 dBi,偏转时交叉极化水平大于24 dBi,对于线极化天线

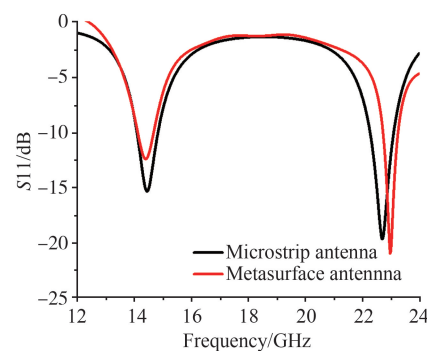


图8 天线S11对比

Fig. 8 Antenna S11 comparison

来说具有良好的交叉极化效果。

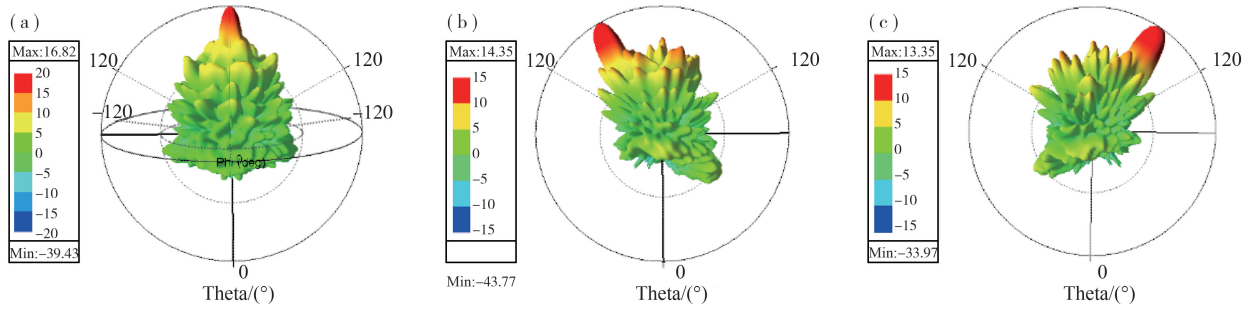


图 9 14.5 GHz 波束方向图(a) 聚焦; (b) -30° 偏转; (c) 30° 偏转

Fig. 9 14.5 GHz beam pattern (a) focusing; (b) -30° deflection; (c) 30° deflection

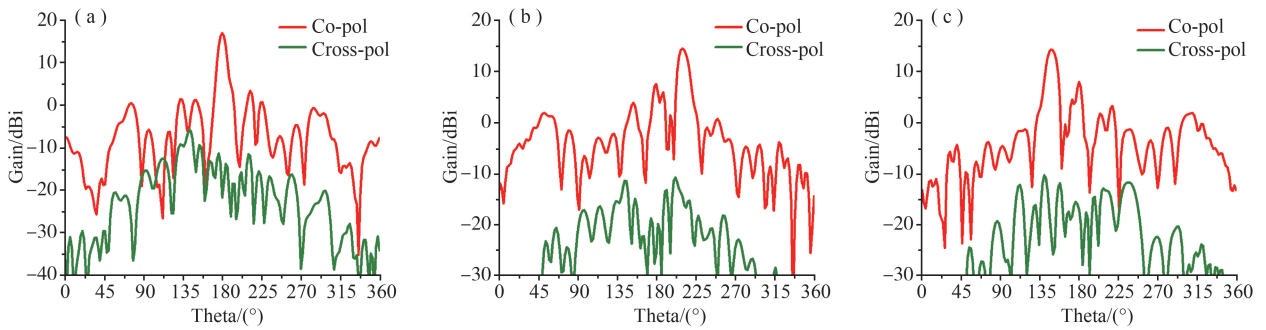


图 10 14.5 GHz 波束二维方向图(a) 聚焦; (b) 30° 偏转; (c) -30° 偏转

Fig. 10 14.5 GHz beam two-dimensional pattern (a) focusing; (b) 30° deflection; (c) -30° deflection

22.7 GHz 时三种波束 3D 辐射效果如图 11 所示, 聚焦及波束偏转与低频方向一致, 因没有超表面阵列时的微带天线在高频时的波束增益比低频时较高, 因此加入超表面阵列后, 高频增益比低频增益略大, 其中聚焦波束峰值增益为 18.05 dBi, 偏转波束峰值增益分别为 15.72、15.07 dBi, 相对于没有超表面阵列时的微带天线, 高频增益增大了 10.09~13.07 dBi。图 12 为三种辐射波束的共极化和交叉极化, 聚焦波束交叉极化水平大于 32 dBi, 偏转波束交叉极化水平为大于 28 dBi。

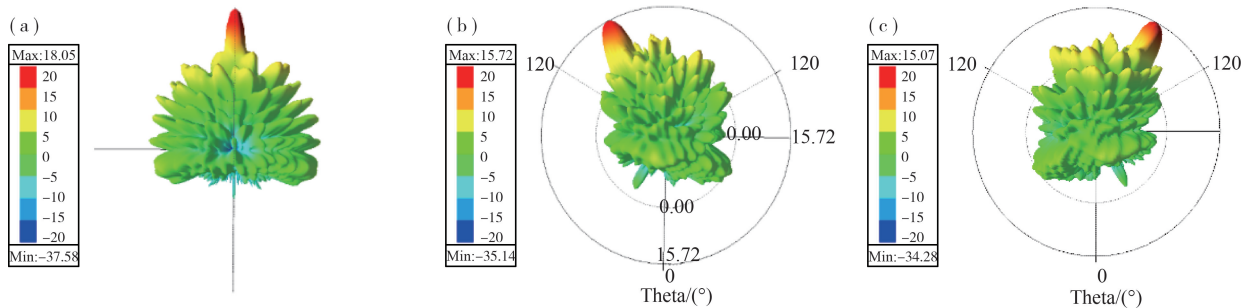


图 11 22.7 GHz 波束方向图(a) 聚焦; (b) -30° 偏转; (c) 30° 偏转

Fig. 11 22.7 GHz beam pattern (a) focusing; (b) -30° deflection; (c) 30° deflection

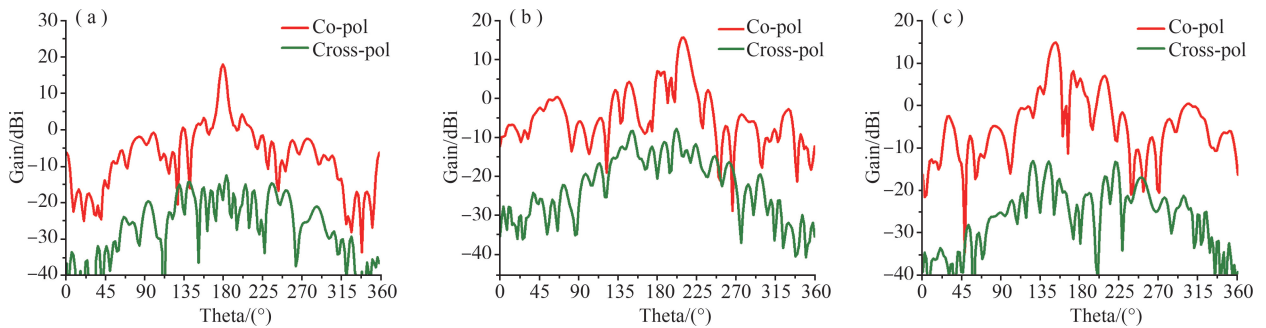


图 12 22.7 GHz 波束二维方向图(a) 聚焦; (b) -30° 偏转; (c) 30° 偏转

Fig. 12 22.7 GHz beam two-dimensional pattern (a) focusing; (b) -30° deflection; (c) 30° deflection

加入超表面后相对于单独的微带天线,交叉极化水平并没有改善,这是因为所设计的天线为线极化天线,而超表面由于所设计结构的特殊性使其垂直极化分量增加,但总体来看对于线极化天线来说具有较好的交叉极化水平。具体性能展现在表 1 中。表 2 给出了与参考文献的性能对比,所设计的多波束天线不仅在双频点实现了波束聚焦和 $\pm 30^\circ$ 波束偏转,还实现了高增益特性。

表 1 波束细节

Table 1 Beam details

Antenna	Frequency/GHz	Direction/ $^\circ$	Gain/dBi
 Focus antenna	14.5	0	16.82
	22.7	0	18.05
 Offset antenna	14.5	± 30	14.35
	22.7	± 30	15.07~15.72

表 2 与其他参考文献对比

Table 1 Compare with other references

Docu	Beam number	Gain/dBi	Gain enhancement /dBi	Bandwidth(%)
References[8]	4	9	2.5	23.6
References[13]	4	10.57	4.27	2.9~3.3
References[14]	4	8.54	2.3	16.5
This work	6	14.35~18.05	10.09~14.03	5.2、3.7

4 结论

利用超表面的电磁调控特性,提出了高增益双频多波束超表面天线,通过改变天线和超表面阵列相对位置改变天线上方超表面相位分布,进而在 14.5 和 22.7 GHz 实现了波束聚焦、波束偏转性能,其中偏转波束指向可由广义斯涅耳定律计算得出,该天线可用于 Ku 波段和 K 波段基站与基站之间以及基站与多用户之间通信。通过仿真设计验证了设想,获得了双频段波束指向为 0° 、 $\pm 30^\circ$ 高增益波束,不同方向的波束均为窄波束且具有高指向性,最高增益为 18.05 dBi。此外,超表面阵列面板可以增大尺寸,容纳更多的天线,从而实现更多的波束辐射方向。

参 考 文 献

- [1] ZHANG X, QIN F, ZHANG H. A compact dual-polarized millimeter-wave multi-beam antenna for 5G applications[C]. //International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology IEEE, 2020, 70(1):116-120.
- [2] BOOTH M B, SURESH V, MICHELUSI N, et al. Multi-armed bandit beam alignment and tracking for mobile millimeter wave communications[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(7):1244-1248.
- [3] LEI L, WAM J, GONG Q. Multibeam antennas with reflector for high throughput satellite applications[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2022, 37(2):34-46.
- [4] KOU P F, CHENG Y J. A dual circular-polarized extremely thin monopulse feeder at w-band for prime focus reflector antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 18(2):231-235.
- [5] FONSECA N J G, LIAO Q, QUEVEDO-TERUEL O. Compact parallel-plate waveguide half-Luneburg geodesic lens in the Ka-band[J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2021, 15(2):123-130.
- [6] YAN Z, ZHANG N, SHAN G. A novel two-dimensional scanning phased array based on pattern recon Figurable antenna[C]. //2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2019, 2:1-3.
- [7] FADHIL T Z, MURAD N A, RAHIM M K A, et al. A beam-split metasurface antenna for 5G applications[J]. Access IEEE, 2022, 10: 1162-1174.

(下转第 79 页)

- opment[J]. Plant Cell Reports, 2024, 43(2):32.
- [57] SONG G, ZHANG J, WANG Y, et al. Overexpression of *PvBiP2* improved biomass yield and cadmium tolerance in switchgrass (*Panicum virgatum* L.)[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 446:130648.
- [58] WEI S, NIU W, ZHAI X, et al. Arabidopsis mtHSC70-1 plays important roles in the establishment of COX-dependent respiration and redox homeostasis[J]. Journal of Experimental Botany, 2019, 70(20):5575-5590.
- [59] SHEN T, JIA N, WEI S, et al. Mitochondrial HSC70-1 regulates polar auxin transport through ROS homeostasis in Arabidopsis roots[J]. Antioxidants-Basel, 2022, 11(10):2035.
- [60] LI G, LI Z, YANG Z, et al. Mitochondrial heat-shock cognate protein 70 contributes to auxin-mediated embryo development[J]. Plant Physiology, 2021, 186(2):1101-1121.
- [61] ZHAI X, BAI J, XU W, et al. The molecular chaperone mtHSC70-1 interacts with DjA30 to regulate female gametophyte development and fertility in Arabidopsis[J]. The Plant Journal, 2023, 115(6):1677-1698.
- [62] OHAMA N, SATO H, SHINOZAKI K, et al. Transcriptional regulatory network of plant heat stress response[J]. Trends in Plant Science, 2017, 22:53-65.
- [63] ZHANG H, SHAO S, ZENG Y, et al. Reversible phase separation of HSF1 is required for an acute transcriptional response during heat shock[J]. Nature Cell Biology, 2022, 24(3):340-352.
- [64] WANG J, CHEN C, WU C, et al. SIMYB41 positively regulates tomato thermotolerance by activating the expression of *SlHSP90*. 3[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2023, 204:108106.
- [65] YANG L, ZHOU Y, WANG S, et al. Noncell-autonomous HSC70.1 chaperone displays homeostatic feedback regulation by binding its own mRNA[J]. New Phytologist, 2023, 237(6):2404-2421.

(责任编辑:刘庆松)

(上接第13页)

- [8] LIU J, REN J, QIN X, et al. Single-layer dipole antenna with large angle beam deflection and frequency scanning capability[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-aided Engineering, 2022, 32(12):e23445.
- [9] PARK J H, LEE J G. Simultaneous beam forming and focusing using a checkerboard anisotropic surface[J]. Electronics, 2022; 11(22): 3823.
- [10] ZHONG M, LI J SH. Terahertz vortex beam and focusing manipulation utilizing a notched concave metasurface[J]. Optics Communications, 2022, 511: 127997.
- [11] JIA Y, JIANG G, LIU Y, et al. Beam scanning for dual-polarized antenna with active reflection metasurface[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(9): 1722-1726.
- [12] VERMA A, ARYA R K, RAGHAVA S N. Metasurface superstrate beam steering antenna with AMC for 5G/WiMAX/WLAN applications[J]. Wireless Personal Communications, 2023, 128(2):1153-1170.
- [13] LUO J, LI L, SU J, et al. Multibeam antenna based on partially reflecting defected metasurface[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(8):1582-158.
- [14] DOU H P, HAN L P, LI L, et al. 2-D low-profile beam switching multibeam antenna based on dimension gradient metasurface[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-aided Engineering, 2022, 32(12):e23428.
- [15] MA B, WU X B, TANG L G, et al. Based on Huygens' super high gain on the surface of the lens antenna[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2020, 33(5): 49-54.
- [16] QI L M, TAO X, LUO T, et al. Broadband terahertz super surface bandpass filter[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2023, 36(3): 9-15.

(责任编辑:赵海军)