

# 基于极化扭转器的宽带全金属可折叠反射阵天线

陈 谦

中国联合网络通信有限公司西安软件研究院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年3月25日; 录用日期: 2024年4月23日; 发布日期: 2024年4月30日

## 摘 要

本文提出了一种基于极化扭转器的新型宽带全金属折叠反射天线。为了提高简单性和降低成本, 本设计专注于1Bit相移的架构。全金属折叠反射阵天线包含全金属极化栅格、基于全金属极化扭转器的宽带全金属反射阵单元以及宽带标准波导馈源。首先, 本文提出了一种简单的全金属极化扭转反射阵单元, 它可以将入射波扭转为与之正交的反射波。所提出的全金属极化扭转单元在12~18 GHz全频段内极化扭转率超过80%。工作在Ku波段的宽带标准波导作为该可折叠反射阵的馈源。最后, 基于所提出的全金属极化扭转单元, 设计、制作宽带全金属折叠反射天线并对其进行测试。测试结果表明, 该全金属折叠反射阵天线获得20%的1 dB增益带宽, 在15 GHz时的峰值增益为22.5 dBi, 最大孔径效率约为29%。该天线的宽带和全金属特性使其在卫星通信中具有很大的应用潜力。

## 关键词

宽带, 可折叠, 全金属, 反射阵

# Wideband Metal-Only Folded Reflectarray Antenna Based on Polarization Twister

Qian Chen

China Unicom Software Xi'an Branch, Xi'an Shaanxi

Received: Mar. 25<sup>th</sup>, 2024; accepted: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2024; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

A novel wideband metal-only folded reflectarray antenna (MFRA) based on sub-wavelength polarization twister is presented in this paper. To improve the simplicity and lower the cost, this design

focuses exclusively on an architecture with 1-Bit phase shifting. The MFRA consists of a metal-only polarization grid (MPG), a wideband metal reflectarray based on sub-wavelength metal-only polarization twister (MPT) and a wideband standard waveguide as the feed. First, a simple MPT element is proposed, which operates two states for rotating polarization of the reflected wave with respect to that of the incident wave. The proposed MPT element provides more than 80% polarization rotating ratio within the whole band of 12~18 GHz. A wideband standard waveguide feed operating at Ku-band is also used to illuminate the MFRA. Finally, based on the proposed MPT element, a broadband MFRA is designed, fabricated and tested. The tested results demonstrate that the MFRA obtains 20% 1-dB gain bandwidth. It has a peak gain of 22.5 dBi gain at 15 GHz. Also, its maximum aperture efficiency is about 29%. Wideband and metal-only features of the MFRA makes it has great potential application in satellite communication.

## Keywords

Wideband, Folded, Metal-Only, Reflectarray

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来,在射电天文学、雷达探测和卫星通信等领域,对高增益天线的需求日益增加。传统的高增益天线主要由阵列天线和抛物面天线组成。尽管抛物面天线具有高增益和宽带的优点,但由于体积大,不便于运输和安装以及对加工精度要求极高,导致成本增加等缺点,严重限制了其在这些领域的发展。微带阵列天线虽然具有低剖面、结构紧凑等优点,但需要复杂的馈电网络,影响了天线阵列的辐射效率。反射阵天线作为一种新型的高增益天线,结合了传统抛物面天线和天线阵列的优点,具有体积小、重量轻、加工简单、成本低、易于实现波束扫描等优点。与微带阵列相比,反射天线采用空间馈电,避免了馈电网络带来的损耗,提高了天线的效率[1] [2] [3]。反射阵天线经过多年的发展,在带宽、极化、增益等性能方面都有了很大的提高。传统反射阵天线通常采用印刷电路板(PCB)技术设计各种高性能天线[4] [5] [6] [7] [8]。但是,当阵列尺寸增大时,介质基板的成本将非常昂贵。此外,对于卫星通信而言,在恶劣的空间环境中引入介电材料会导致天线性能下降。为了防止辐射和热应力对天线的影 响,可以在天线上加装天线罩,但同时会增加天线的重量、体积和成本。为了解决这些问题,使用全金属反射天线是较好的替代方案之一。近年来,国内外学者对全金属反射天线进行了较为详细的研究。到目前为止,各种高性能的全金属反射阵天线已经在[9] [10] [11] [12] [13]中被提出。例如,针对低成本的全金属反射阵天线,提出了一种新型的缝隙可重生单元,该反射阵天线获得了 12.8%的 1 dB 增益带宽和 53.8%的最大孔径效率。文献[10]报道了一种工作频率为 20 GHz 的圆极化全金属反射阵天线,其 1 dB 增益带宽为 6.8%, 3 dB 轴比带宽为的 32.5%。

然而,目前全金属反射阵天线的纵向剖面过高,其在许多方面的应用受到限制,如加工装配及与其他平台的集成。近年来,[14]-[20]对如何减小反射阵天线剖面进行了一些研究,但仍局限于使用介质 PCB 技术,对低剖面全金属反射阵天线的研究较少。因此,本文在传统反射阵天线的基础上,设计了一款全金属折叠反射阵天线。

## 2. 天线设计

### 2.1. 工作原理

图 1 给出了全金属折叠反射阵天线的工作原理。该天线由三部分组成：上层为全金属极化栅，底层为全金属反射阵天线，反射阵中间为标准金属波导馈源。上层全金属极化栅可以反射一种极化电磁波，同时传输其正交极化电磁波。波导馈源发射的球面线极化波首先照射到全金属极化栅上，然后反射到底层的金属反射阵上。然后，底层反射阵将该极化波扭转为与它正交的电磁波，同时可以转换成高增益平面波，通过上层的全金属极化栅辐射到自由空间。基于光线追踪原理[14]，本文提出的全金属可折叠反射阵高度约为传统的反射阵纵向高度的 1/2。

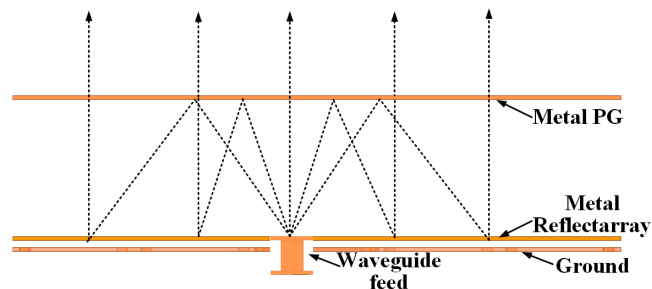


Figure 1. Diagram of the proposed MFRA  
图 1. 全金属折叠反射阵的原理示意图

### 2.2. 天线单元结构与分析

所提出的全金属极化扭转反射阵单元的结构如图 2 所示。该单元由两个金属层和一个空气层组成。顶部金属层由倾斜金属条和空气缝隙组成，底层是金属地板。两个金属层被高度  $H = 3 \text{ mm}$  的空气层隔开。所提出的全金属反射阵单元可以将一个线极化波转换成与之正交的线极化波。所提出的全金属极化栅的结构如图 3 所示，它由一系列等间距的金属条组成。为了获得更好的电磁性能，利用 Ansys HFSS 软件在 Floquet 周期边界条件下对两种单元进行了仿真分析。所有金属的材料都设定为铝，电导率为  $3.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ 。

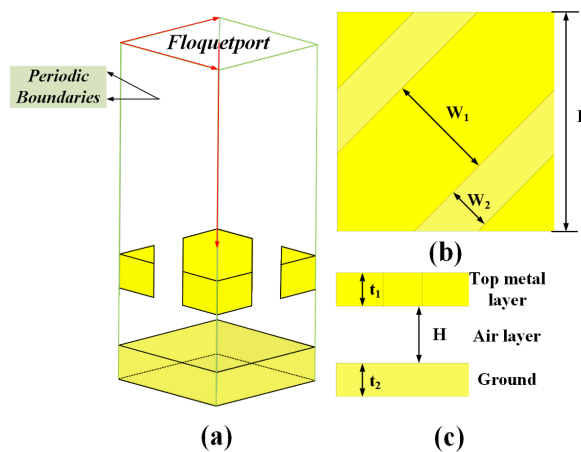
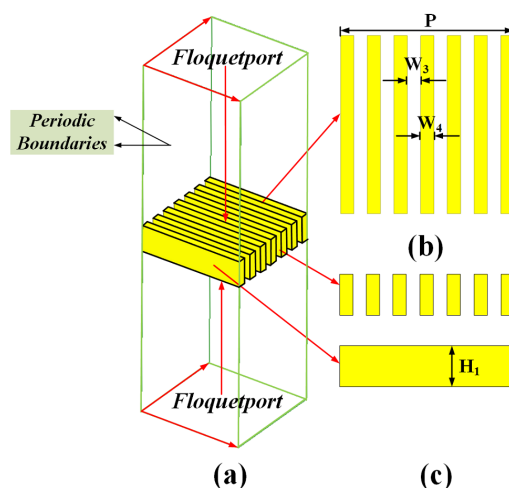


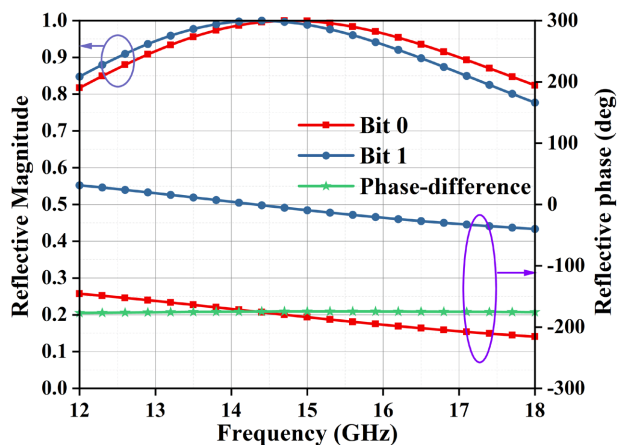
Figure 2. Configurations of the MFRA element. (a) Overall configuration; (b) Top view of the element; (c) Side view of the element

图 2. 全金属反射阵单元结构示意图(a) 单元整体结构图; (b) 单元顶视图; (c) 单元侧视图



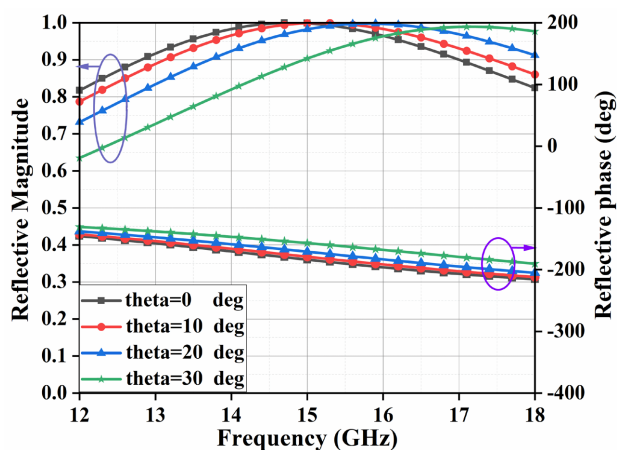
**Figure 3.** Configurations of the MPG element. (a) Overall configuration, (b) Top view of the element, and (c) Side view of the element

**图 3.** 全金属极化栅结构示意图(a) 单元整体结构图；(b) 单元顶视图；(c) 单元侧视图



**Figure 4.** Reflective amplitudes and reflective phases versus frequency with two states for Bit 0 and Bit 1

**图 4.** 单元在两种状态 Bit 0 和 Bit 1 下不同频率处的反射幅度和反射相位



**Figure 5.** Reflective amplitudes and reflective phases versus frequency for bit 0 with different incident angles

**图 5.** 单元在 Bit 0 状态下不同频率处随不同入射角度变化的反射幅度和反射相位

全金属反射阵单元在两种状态下的反射幅度和反射相位随频率的变化如图 4 所示。从图 4 可以看出，Bit 0 和 Bit 1 两种状态下的反射幅度几乎相同，在 12~18 GHz 的整个频段内，这两种情况下的反射相位差为 180°，表明所提出的全金属反射阵单元具有实现宽带 1 比特相位量化的适用性。由于反射阵中的大多数单元都被馈源入射波进行斜照射，因此需要研究不同入射角下单元的反射性能。图 5 给出了单元在 Bit 0 状态下不同频率处随不同入射角度变化的反射幅度和反射相位，相位变化量很小，对阵列天线设计没有影响。因此，在阵列设计中，利用单元在正入射时的反射相位曲线来确定阵列中各个单元的尺寸。

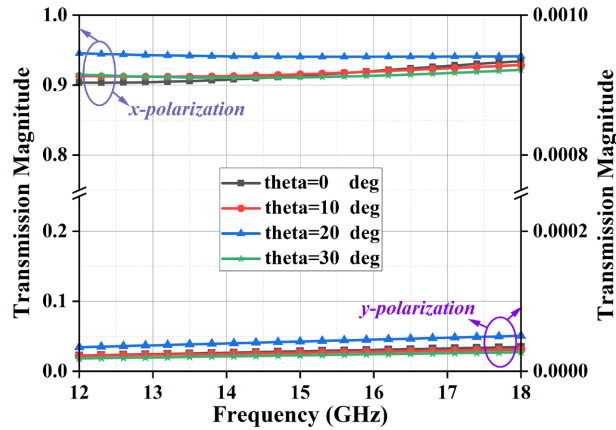


Figure 6. Transmission magnitude of two polarizations wave versus frequency with different incident angles  
图 6. MPG 单元在不同入射角情况下两种极化随频率变化的传输幅度曲线

本节设计的 MPG 单元结构如图 3 所示，金属条带周期性排布。在 HFSS 软件中采用周期边界对其进行仿真，通过仿真优化所有的结构参数，使线极化栅达到最佳的电磁性能。图 6 给出了线极化栅对于两种极化波在不同入射角情况下的传输幅度曲线。从图中可以看出，该单元能完美地透过一种线极化波，反射与之正交的另一种线极化波，且在斜入射情况下单元仍具有良好的极化选择特性。此外，表 1 给出了这两种结构的具体尺寸。

Table 1. Parameter values of the MFRA element and the MPG unit (units: mm)

表 1. 单元的主要结构参数取值(单位: mm)

P	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	H	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>4</sub>	H <sub>1</sub>
4	2	0.8	1.5	1	1	0.3	0.3	1

### 2.3. 馈源设计

本次设计选择一个宽带标准波导作为全金属折叠反射阵天线的馈源。馈源天线的仿真反射系数如图 7(a)所示，其-10 dB 反射系数带宽为 12~18 GHz，覆盖了全金属折叠反射阵天线的工作频段。此外，图 7(b)给出了馈源天线在 15 GHz 时的归一化 E 面和 H 面辐射方向图。如图 7(b)所示，两个面的-3 dB 波束宽度分别为±28°和±44°，满足馈源的设计要求。

### 2.4. 天线阵列设计

基于全金属折叠反射阵天线的工作原理和上述单元分析，设计并仿真了中心频率为 15 GHz 的宽带全金属折叠反射阵天线。提出的全金属折叠反射阵天线的孔径为 140 mm，等于 7λ<sub>0</sub> (λ<sub>0</sub> 为 15 GHz 波长)，包含 1210 个单元。全金属折叠反射阵天线的焦径比值为 0.6。上层全金属极化栅与下层全金属反射阵具有

相同的孔径，且两者之间的距离为 35 mm (约  $F/2$ )。馈源位于下层全金属反射阵的中心。使用介电螺钉固定和分离两个金属层。基于所提出的全金属反射阵单元，设计、制作并测试了宽带全金属反射阵天线，验证了该设计方法。图 8 给出了全金属折叠反射阵天线的照片。最后，利用暗室的测量系统对所提出的全金属折叠反射阵天线进行了测试。

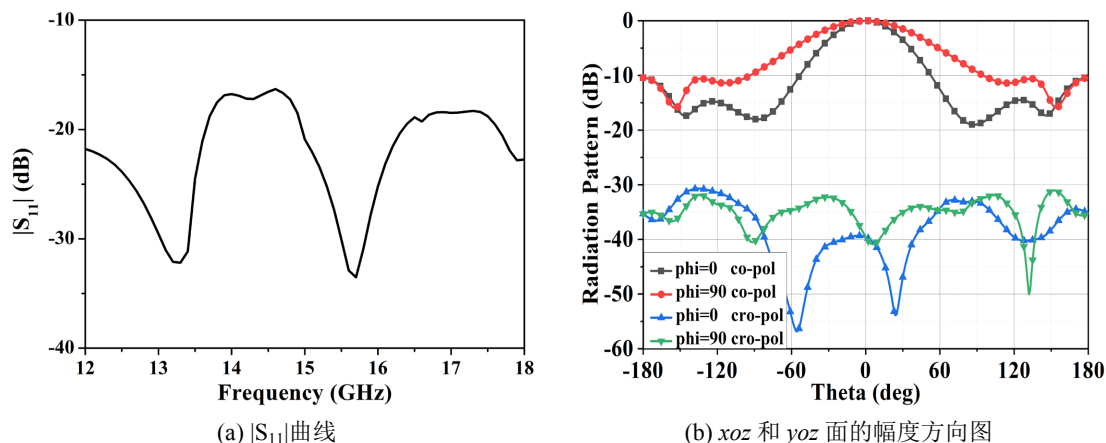


Figure 7. Simulated results of the feed antenna. (a)  $|S_{11}|$ , and (b) E-plane and H-Plane radiation patterns at 15 GHz  
图 7. 馈源天线的  $|S_{11}|$  和 15 GHz 频点处的 E 面和 H 面的方向图仿真结果

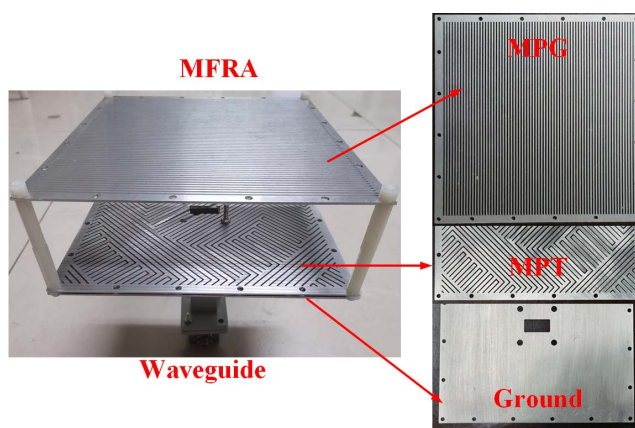
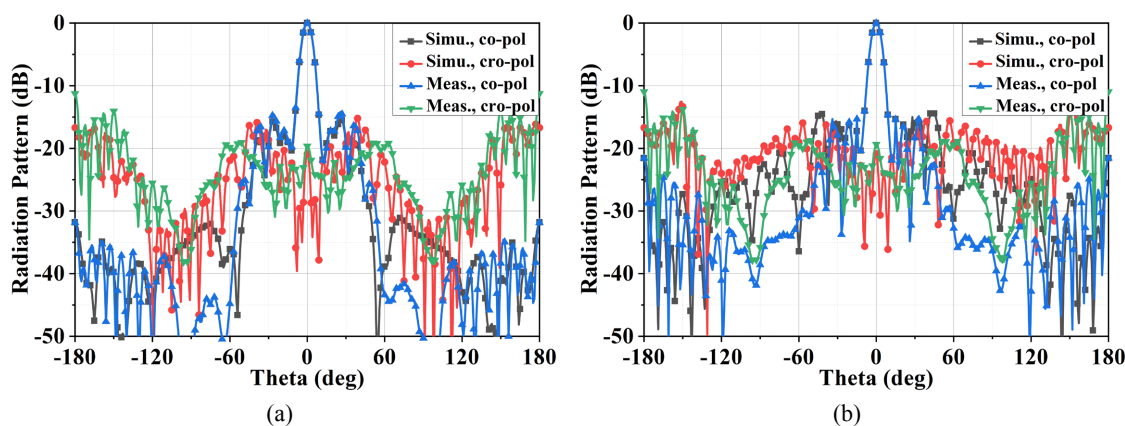
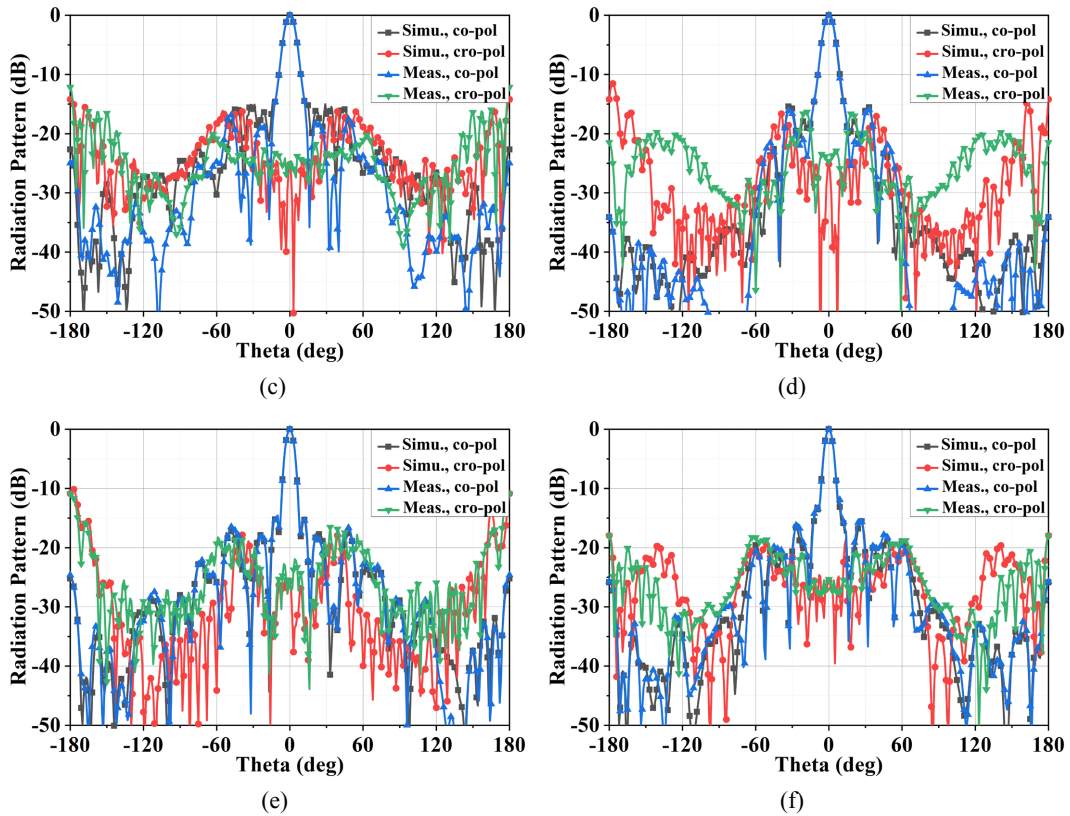


Figure 8. Schematic diagram of the MFRA  
图 8. 全金属折叠反射阵天线实物图

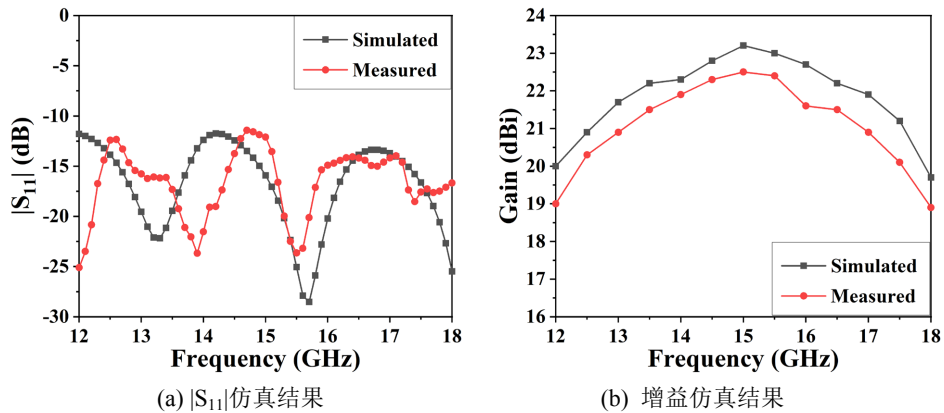




**Figure 9.** Simulated and measured normalized radiation patterns of the proposed MFRA in (a) the  $xoz$  plane at 13 GHz; (b) the  $yozy$  plane at 13 GHz; (c) the  $xoz$  plane at 15 GHz; (d) the  $yozy$  plane at 15 GHz; (e) the  $xoz$  plane at 17 GHz; (f) the  $yozy$  plane at 17 GHz

**图9.** 该全金属折叠反射阵天线在三个不同频率下的仿真和测量的归一化辐射方向图(a) 13 GHz  $xoz$  面; (b) 13 GHz  $yozy$  面; (c) 15 GHz  $xoz$  面; (d) 15 GHz  $yozy$  面; (e) 17 GHz  $xoz$  面; (f) 17 GHz  $yozy$  面

图9显示了  $xoz$  和  $yozy$  平面在三个不同频率下的仿真和测量的归一化辐射方向图。从图中可以看出，仿真结果与实测结果吻合较好。测量的旁瓣电平在 15 GHz 时小于  $-15$  dB。此外，由于全金属极化栅的存在，在最大辐射方向上测量到的交叉极化电平小于  $-20$  dB。在高频和低频，全金属折叠反射阵天线也有稳定的辐射方向图。综上所述，该天线的辐射方向图、旁瓣和交叉极化在整个频段内都具有良好的特性。



**Figure 10.** Simulated and measured results of the proposed MFRA (a)  $|S_{11}|$  and (b) gains

**图10.** 全金属折叠反射阵的 $|S_{11}|$ 和增益的仿真和实测结果

所提出的全金属折叠反射阵天线的仿真和测量的 $|S_{11}|$ 和增益结果如图 10 所示。从图中可以看出，测试结果表明，全金属折叠反射阵天线获得 20% 的 1 dB 增益带宽。它在 15 GHz 时的峰值增益为 22.5 dBi，最大孔径效率约为 29%，仿真结果与实测结果吻合较好。

### 3. 结论

本文提出了一种基于极化扭转器的新型宽带全金属折叠反射天线。为了提高简单性和降低成本，本设计专注于 1 Bit 相移的架构。全金属折叠反射天线包含全金属极化栅格、基于全金属极化扭转器的宽带金属反射阵单元以及宽带标准波导馈源。首先，本文提出了一种简单的全金属极化扭转单元，它可以将入射波扭转为与之正交的反射波。所提出的全金属极化扭转单元在 12~18 GHz 全频段内极化扭转率超过 80%。工作在 Ku 波段的宽带标准波导作为可折叠反射阵的馈源。最后，基于所提出的全金属极化扭转单元，设计、制作并测试了宽带全金属折叠反射天线。测试结果表明，该全金属折叠反射阵天线获得 20% 的 1 dB 增益带宽，在 15 GHz 时的峰值增益为 22.5 dBi，最大孔径效率约为 29%。该天线的宽带和全金属特性使其在卫星通信中具有很大的应用潜力。

### 参考文献

- [1] Berry, D., Malech, R. and Kennedy, W. (1963) The Reflectarray Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **11**, 645-651. <https://doi.org/10.1109/TAP.1963.1138112>
- [2] Huang, J. and Encinar, J.A. (2008) Reflectarray Antennas. Wiley, Hoboken, USA. <https://doi.org/10.1002/9780470178775>
- [3] Pozar, D.M., Targonski, S.D. and Syrigos, H.D. (1997) Design of Millimeter Wave Microstrip Reflectarrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **45**, 287-296. <https://doi.org/10.1109/8.560348>
- [4] Wilke, R., Schraml, K. and Heberling, D. (2015) Space Radiation Hardness of PTFE Based RF Substrates for GEO Satellite Application. *Proceedings of 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation*, Lisbon, Portugal, 13-17 April 2015.
- [5] Malfajani, R.S. and Atlasbaf, Z. (2012) Design and Implementation of a Broadband Single Layer Circularly Polarized Reflectarray Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **11**, 973-976. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2012.2213570>
- [6] Qin, P.Y., Guo, Y.J. and Weily, A.R. (2016) Broadband Reflectarray Antenna Using Subwavelength Elements Based on Double Square Meander-Line Rings. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **64**, 378-383. <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2502978>
- [7] Guclu, C., Perruisseau-Carrier, J. and Civi, O.A. (2012) Proof of Concept of a Dual-Band Circularly-Polarized RF MEMS Beam-Switching Reflectarray. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **60**, 5451-5455. <https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2207690>
- [8] Zhao, G., Jiao, Y.C., Zhang, F. and Zhang, F.S. (2010) A Subwavelength Element for Broadband Circularly Polarized Reflectarrays. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **9**, 330-333. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2010.2047836>
- [9] Cho, Y.H., Byun, W.J. and Song, M.S. (2011) High Gain Metal-Only Reflectarray Antenna Composed of Multiple Rectangular Grooves. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **59**, 4559-4568. <https://doi.org/10.1109/TAP.2011.2165479>
- [10] An, W.X., Xu, S.H. and Yang, F. (2014) A Metal-Only Reflectarray Antenna Using Slot-Type Elements. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **13**, 1553-1556. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2342376>
- [11] Deng, R., Yang, F., Xu, S. and Li, M. (2016) A Low-Cost Metal-Only Reflectarray Using Modified Slot-Type Phoenix Element With 360° Phase Coverage. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **64**, 1556-1560. <https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2526258>
- [12] Henderson, K.Q. and Ghalichechian, N. (2020) Circular-Polarized Metal-Only Reflectarray with Multi-Slot Elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **68**, 6695-6703. <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2993229>
- [13] Deng, R., Xu, S., Yang, F. and Li, M. (2017) Design of a Low-Cost Single-Layer X/Ku Dual-Band Metal-Only Reflectarray Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **16**, 2106-2109. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2698099>



- 
- [14] Menzel, W., Pilz, D. and Tikriti, M. (2002) 60 GHz Triple Folded Reflector Antenna. *Electronics Letters*, **38**, 1075-1076. <https://doi.org/10.1049/el:20020779>
- [15] Tarn, I., Wang, Y. and Chung, S. (2008) A Dual-Mode Millimetre-Wave Folded Microstrip Reflectarray Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **56**, 1510-1517. <https://doi.org/10.1109/TAP.2008.923310>
- [16] Nguyen, B.D., Lanteri, J., Dauvignac, J.-Y., et al. (2008) 94 GHz Folded Fresnel Reflector Using C-Patch Elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **56**, 3373-3381. <https://doi.org/10.1109/TAP.2008.2005452>
- [17] Menzel, W., Pilz, D. and Al-Tikriti, M. (2002) Millimeter-Wave Folded Reflector Antennas with High Gain, Low Loss, and Low Profile. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, **44**, 24-29. <https://doi.org/10.1109/MAP.2002.1028731>
- [18] Zeitler, A., Lanteri, J., Pichot, C. and Migliaccio, C. (2010) Folded Reflectarrays with Shaped Beam Pattern for Foreign Object Debris Detection on Runways. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **58**, 3065-3068. <https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2052564>
- [19] Guo, L., Tan, P.-K. and Chio, T.-H. (2017) On the Use of Single-Layered Subwavelength Rectangular Patch Elements for Broadband Folded Reflectarrays. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **16**, 424-427. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2582201>
- [20] Jeong, J.G., Park, N.J. and Yoon, Y.J. (2014) Aperture Efficiency Improvement of Folded Reflectarray Using Rectangle and Split-Ring Combined Element. *Electronics Letters*, **54**, 797-798. <https://doi.org/10.1049/el.2018.1194>