

宽带折叠传输阵天线

陈官韬, 倪涛, 吕苗, 景跃骐

西安导航技术研究所, 陕西 西安

收稿日期: 2022年7月3日; 录用日期: 2022年8月3日; 发布日期: 2022年8月12日

摘要

本文介绍了一款基于多层频率选择表面的宽频带折叠传输阵天线。该天线包含上层加载线极化栅的平面传输阵面、下层宽带极化扭转反射表面以及平面微带贴片阵列馈源。首先, 提出并设计了一款加载线极化栅的三层双环传输阵单元, 它可以反射一种线极化波, 同时透射另一种与之正交的线极化波。其次, 设计了一款宽带反射型极化扭转单元, 它可以把一种线极化波扭转为与之正交的另一种线极化波。由于线极化栅和反射型极化扭转单元的存在, 上层传输阵面与下层极化扭转反射阵面之间的距离缩减为等效馈源与平面传输阵之间距离的三分之一。最后, 加工制作该折叠传输阵。实测结果显示, 该天线获得了7%的1-dB增益带宽, 天线在中心频点21 GHz处获得了最大增益23.8 dBi, 辐射效率为39%。

关键词

宽带, 可折叠, 传输阵, 极化扭转反射表面, 极化栅

Design of the Wideband Folded Transmitarray Antenna

Guantao Chen, Tao Ni, Miao Lv, Yueqi Jing

The Xi'an Research Institute of Navigation Technology, Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 3rd, 2022; accepted: Aug. 3rd, 2022; published: Aug. 12th, 2022

Abstract

In this paper, a novel folded transmitarray antenna based on the polarization grid (PG) is presented. The transmitarray antenna consists of a planar transmission array, a wideband polarization rotation reflection surface (PRRS) and a wideband stacked microstrip patch array as the primary source. First, a simple three-layer double-ring transmitarray element with the PG is designed, which can reflect one linearly polarized (LP) wave while transmit its orthogonal LP wave. Then, a

wideband PRRS element is designed, by which one LP wave can be converted into its orthogonal LP wave. Due to the introduction of PG and PRRS, the distance between the transmitarray plane and the feed phase center can be reduced to about 1/3 of the original focal length. A folded transmitarray antenna is designed, fabricated and measured. The measured results indicate that the proposed antenna achieves 7% 1-dB gain bandwidth with 23.8 dBi gain at 21 GHz. Its maximum aperture efficiency is about 39%.

Keywords

Wideband, Folded, Transmitarray, Polarization Rotating Reflection Surface (PRRS), Polarization Grid (PG)

Copyright © 2022 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

现代通信系统对作为其关键部件的天线提出了越来越高的性能要求,使其朝着小型化、低剖面、多功能、高集成度的方向发展。尽管传输阵天线作为一种新型的高增益天线已经引起了国内外学者的广泛关注,但由于其采用空馈形式,导致其剖面过高,严重限制了其应用范围。与折叠反射阵不同的是,折叠传输阵由于其传输阵面在馈源的上方,其纵向高度比折叠反射阵的更低,因此对折叠传输阵天线展开深入研究,具有重要的理论意义和工程应用前景。

基于透镜天线理论, Pozar 等人第一次提出了平面传输阵天线的概念[1]。之后,各种各样的传输阵天线被设计出来。例如,多层频率选择表面堆叠技术被用来设计传输阵天线单元,可以增加传输阵天线的带宽[2] [3]。此外,另一种被称为“接收-传输”模式的机制也被用来设计传输阵天线[4] [5]。然而,这些传统的传输阵天线都具有较高的剖面,严重限制了其在某些小型化系统中的集成与应用。最近,一些致力于降低传输阵天线的纵向剖面的方法被设计出来,主要包括以下两类:第一类是通过降低天线单元的剖面来降低传输阵天线的高度[6] [7]。例如,一款使用“Malta”十字结构的双层传输阵单元被设计出来,其剖面仅有 0.14 个工作波长[6]。第二类天线通过减小馈源与阵面之间的距离来降低传输阵天线的高度[8] [9] [10]。例如,通过使用极化扭转传输阵单元使得馈源与阵面之间的距离减小为原来焦距的 1/3 或者 1/4 [8] [9]。然而,这些单元的设计过程较为复杂,且整个天线由于采用喇叭天线作为馈源使得整个天线的体积庞大,不适合小型化趋势。

不同于以前传统的折叠传输阵天线,本文提出的一种宽带可折叠传输阵天线设计,通过在传统的频率选择表面基础上加载线极化栅,实现了传输阵天线的折叠功能,极大降低了传统传输阵的纵向剖面高度,此外,采用平面微带馈源实现了传输阵天线的小型化设计。

2. 天线设计

2.1. 工作原理

如图 1(a)所示,传统的传输阵天线包含一个馈源和一个传输阵面。馈源发出的球面波经过传输阵面后,被转化为平面波辐射到自由空间中去。较大的焦径比增加了传输阵的纵向高度,限制了其应用范围。折叠传输阵天线的结构示意图如图 1(b)所示。该天线包含一个加载线极化栅的传输相移表面,

一个反射型极化扭转表面和一个线极化馈源。加载极化栅的传输相移表面可以反射一种线极化波，同时传输与之正交的另一种线极化波，并且提供相移补偿。馈源发出的一种线极化球面波到达上层传输相移表面，被反射到下层极化扭转表面，经极化扭转表面再反射，同时把极化方向扭转了 90° （与之正交的另一种线极化波），这种线极化波将透过上层传输相移表面，并且通过相移补偿被转化为平面波辐射到自由空间。天线的等效馈源位置与传统天线的馈源位置重合，基于射线追踪原则，此时天线的纵向高度仅为原来的 $1/3$ 。

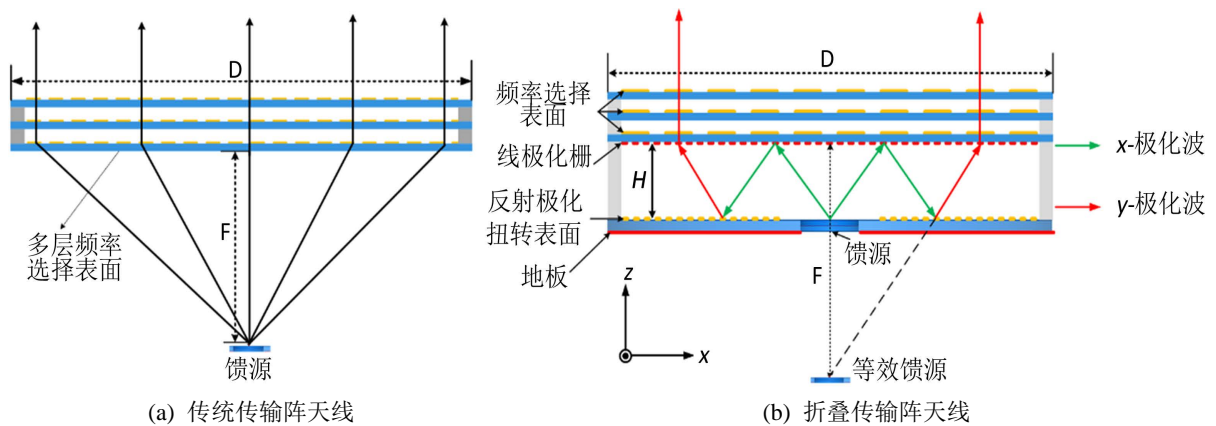


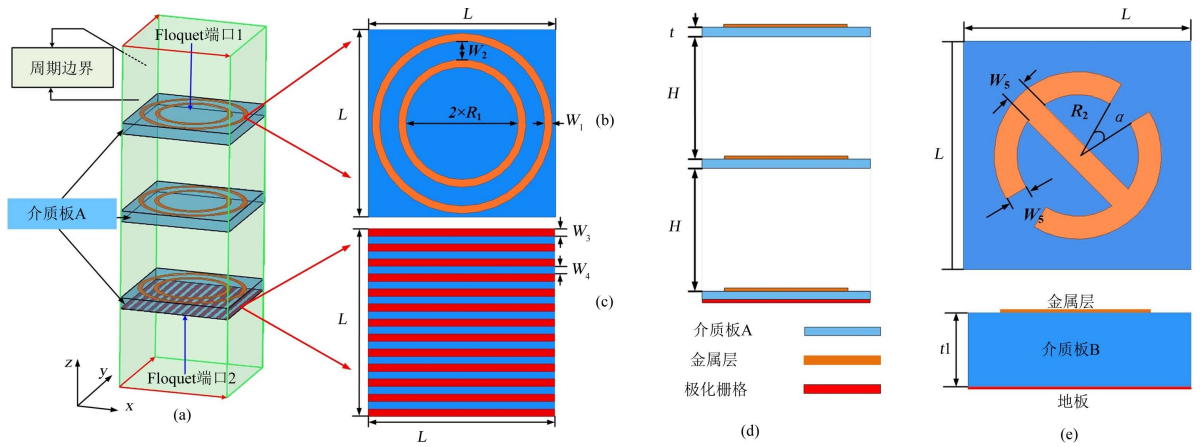
Figure 1. Diagram of the proposed traditional and folded transmitarray
图 1. 传统传输阵和折叠传输阵的结构示意图

2.2. 天线单元结构与分析

本节所设计的折叠传输阵单元结构是在经典传输阵单元基础上改进的，在频率选择表面的最底部加载线极化栅，使其传输一种线极化波的同时反射与之正交的另一种线极化波。加载线极化栅的传输阵单元如图 2(a)所示，该单元包含三个介质层，三层双环金属结构分别印刷在三层介质板的上表面，线极化栅印刷在最下层介质板的下表面。三层介质板采用相同的材料为 F4B ($\epsilon_r = 2.2$, $\tan\delta = 0.001$)，厚度均为 $t = 0.5$ mm。此外，三层介质板之间具有相同的空气间隔 $H = 3.5$ mm。PRRS 单元结构如图 2(e)所示，图中给出了单元的俯视图和侧视图。弧形“1”形金属层印刷在 $\epsilon_r = 2.65$, $\tan\delta = 0.009$ 的 F4B 介质板上，其中开口环的角度为 $\alpha = 25^\circ$ ，介质板下表面为金属地板。两个单元的详细结构参数值如表 1 所示。考虑到单元之间的互耦，采用 Ansys HFSS 中的周期边界对单元的电磁性能进行仿真，通过对单元的主要参数进行仿真分析优化，获得了良好的相移特性。

图 3 给出了加载线极化栅的传输阵单元的传输响应。图 3(a)给出了单元在不同频点处的传输幅度和相位随参数 R_1 的变化曲线。从图中可以看出，在中心频点 21 GHz 处，在 -3 dB 传输幅度内传输相移达到了 310° ，且相移曲线在不同频点处几乎平行，传输幅度也在可接受范围内。图 3(b)给出了单元在 21 GHz 频点处，两种极化波在不同入射角情况下的传输幅度和相位曲线。从图中可以看出，该单元可以完美地传输一种线极化波，同时反射与之正交的另一种线极化波，且透过的线极化波在不同入射角情况下的传输幅度和相位几乎没有明显变化，有利于传输阵设计。因此，在设计阵列时，利用单元在正入射时的传输相位曲线来确定传输阵中各单元的结构尺寸。

图 4 给出了 PRRS 单元在不同入射角情况下的反射幅度曲线，其中 $|R_{yx}|$ 表示 y-极化波转化为 x-极化波的反射幅度， $|R_{yy}|$ 表示 y-极化波的反射幅度。从图中可以看出，该 PRRS 单元在整个频带内具有极高的极化扭转率，y-极化波几乎全部被扭转为 x-极化波，满足折叠反射阵对 PRRS 的设计要求。



(a) Overall configuration, (b) the phase shift unit, (c) the polarization grid, (d) side view of the element, and (e) the PRRS unit with $\theta = 25^\circ$

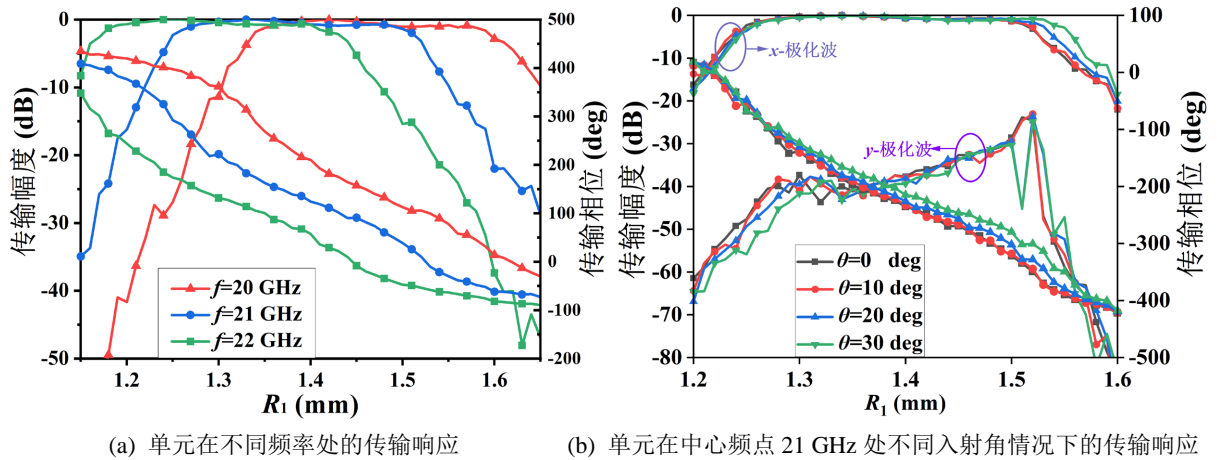
Figure 2. Configurations of the transmitarray element and the PRRS unit

图 2. 加载线极化栅的传输阵单元和 PRRS 单元结构示意图

Table 1. Parameter values of the transmitarray element and the PRRS unit (Units: mm)

表 1. 传输阵单元和 PRRS 单元的主要结构参数取值(单位: mm)

L	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	R_2	t	t_1	H
5	0.2	0.5	0.2	0.2	0.5	1.83	0.5	2	3.5



(a) 单元在不同频率处的传输响应

(b) 单元在中心频点 21 GHz 处不同入射角情况下的传输响应

Figure 3. Transmission amplitudes and phases versus R_1 at different frequencies and different incident angles

图 3. 传输阵单元在不同频率和不同角度下随不同 R_1 值的传输幅度和相位

2.3. 馈源设计

喇叭天线纵向尺寸较大, 加工成本高, 不适合用作折叠传输阵天线的馈源。本天线选用平面馈源代替喇叭天线作为折叠传输阵天线的馈源, 以使整个天线更加紧凑, 更容易与其它平台集成。设计了一款工作在 K 波段的平面微带堆叠贴片天线阵列。图 5 给出了该平面馈源的结构示意图。图 6 给出了馈源的反射系数曲线和两个面的仿真方向图, 从图中可以看出, 馈源的 -10 dB 反射系数带宽为 $19\sim 23$ GHz, 覆盖了传输阵天线的工作频带。此外, 图 6(b)给出了馈源在中心频点 21 GHz 处两个面的仿真方向图, 两个面的 -10 dB 波束宽度分别为 $\pm 41^\circ$ 和 $\pm 42^\circ$, 可用 $\cos^9(\theta_e)$ 函数来近似, 且两个面的方向图基本等化, 满足馈源的设计要求。馈源的详细结构参数如表 2 所示。

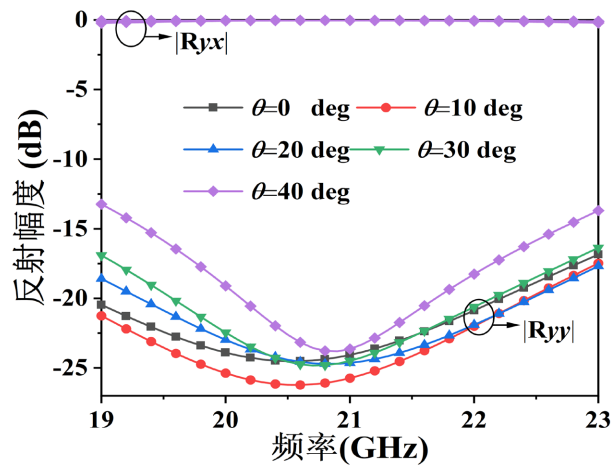


Figure 4. Reflective amplitudes $|R_{yx}|$ and $|R_{yy}|$ versus frequency with different incident angles

图 4. PRRS 单元在不同入射角情况下随频率变化的 $|R_{yx}|$ 和 $|R_{yy}|$ 反射幅度

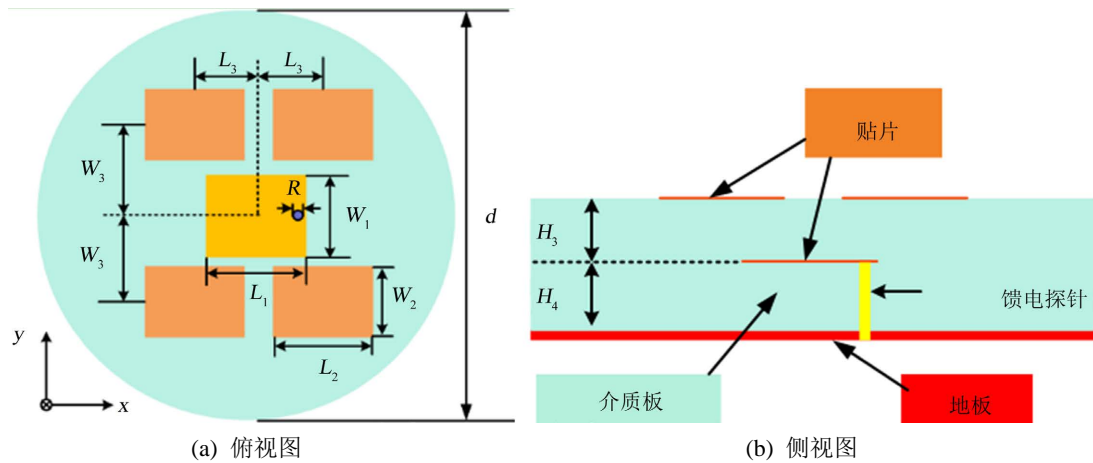


Figure 5. Structure of the linearly polarized feed antenna

图 5. 线极化馈源天线结构示意图

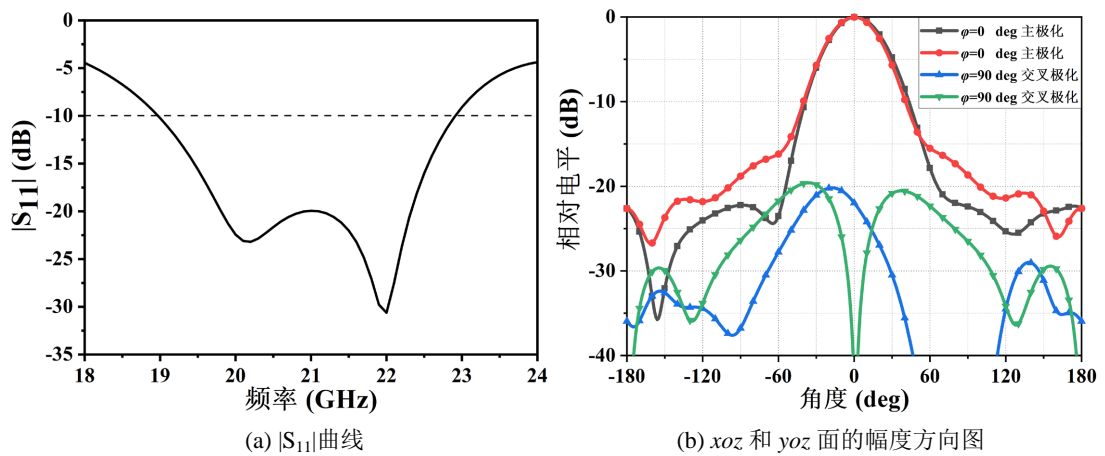


Figure 6. Simulated $|S_{11}|$, and (b) E-plane and H-plane radiation patterns at 21 GHz of the feed antenna

图 6. 馈源的 $|S_{11}|$ 和 21 GHz 频点处的 E 面和 H 面方向图仿真结果

Table 2. Parameter values of the feed antenna (Units: mm)
表 2. 馈源天线的主要结构参数取值(单位: mm)

d	L_1	L_2	L_3	W_1	W_2	W_3	H_1	H_2	R
18	4.6	3.9	2.9	3.6	3.1	3.6	1	1	0.5

2.4. 天线阵列设计

如图 7(a)所示, 为了把馈源发出的球面波转化为特定方向(θ_0 和 φ_0)高增益的平面波, 阵面上单元需要提供的补偿相移量为:

$$\varphi_{element}(x_i, y_i) = k_0(d_i - \sin\theta_0(x_i \cos\varphi_0 + y_i \sin\varphi_0)) \quad (2-1)$$

式中 k_0 为自由空间中的波数, d_i 为单元与馈源相位中心之间的距离

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_f)^2 + (y_i - y_f)^2 + z_f^2} \quad (2-2)$$

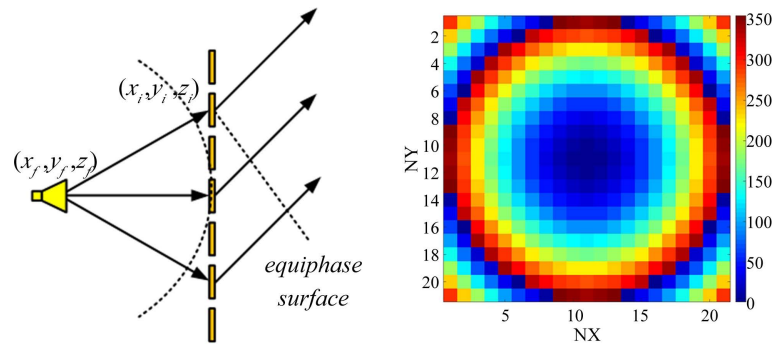


Figure 7. (a) Principle diagram of the phase compensation for the transmitter array and (b) the array phase distribution
图 7. (a) 传输阵天线的相位补偿原理图和(b)阵列相位分布图

根据公式(2-1)和(2-2), 可计算出阵列每个单元所需要提供的补偿相位, 如图 7(b)所示。根据阵列相位分布, 确定阵列单元的结构尺寸, 完成整体阵列的设计。根据馈源的-10 dB 波束宽度, 可确定折叠传输阵的焦径比为 0.6。上层传输阵列的口径为圆形, 直径为 105 mm, 每层包含 303 个单元, 下层 PRRS 表面具有相同的圆口径, 两者之间的距离为 23 mm, 采用介质柱支撑。采用 HFSS 软件对该天线进行全波仿真分析。为了进一步验证所提出的折叠传输阵天线的电磁性能, 对其进行了加工和测试。图 8 给出了折叠传输阵天线的实物照片以及测量场景。测试过程中, 对天线的反射系数和远场辐射性能进行了测试。图 9 给出了该折叠传输阵天线在不同频点(20.5 GHz、21 GHz 和 22 GHz)处的仿真和实测归一化方向图。从图中可以看出, 各个频点的实测与仿真方向图基本一致。在中心频点 21 GHz 处, 天线在两个面的半功率波束宽度分别为 6.8°和 7.3°, 副瓣电平低于-15 dB, 交叉极化电平低于-25 dB。在 20.5 GHz 和 22 GHz 频率处, 天线也具有稳定的方向图。

图 10 给出了该折叠传输阵天线的 $|S_{11}|$ 和增益的仿真与实测结果, 从图 10(a)可以看出, 该天线获得了 9.5%的-10 dB 反射系数带宽。图 10(b)给出了增益的仿真与实测结果。从图中可以看出, 天线获得了 7%的 1-dB 增益带宽, 天线在中心频点 21 GHz 处获得了最大增益 23.8 dBi, 辐射效率为 39%。实测与仿真曲线基本一致, 进一步验证了设计方法的有效性。实测增益略低于仿真增益值, 这主要是由加工和测试误差造成的。

表 3 给出本文设计的天线与现有工作的一些比较。通过对比可以发现，本文所设计的可折叠传输阵天线在带宽和纵向高度两个方面均做出了较好的改善，实现了传输阵天线的小型化。

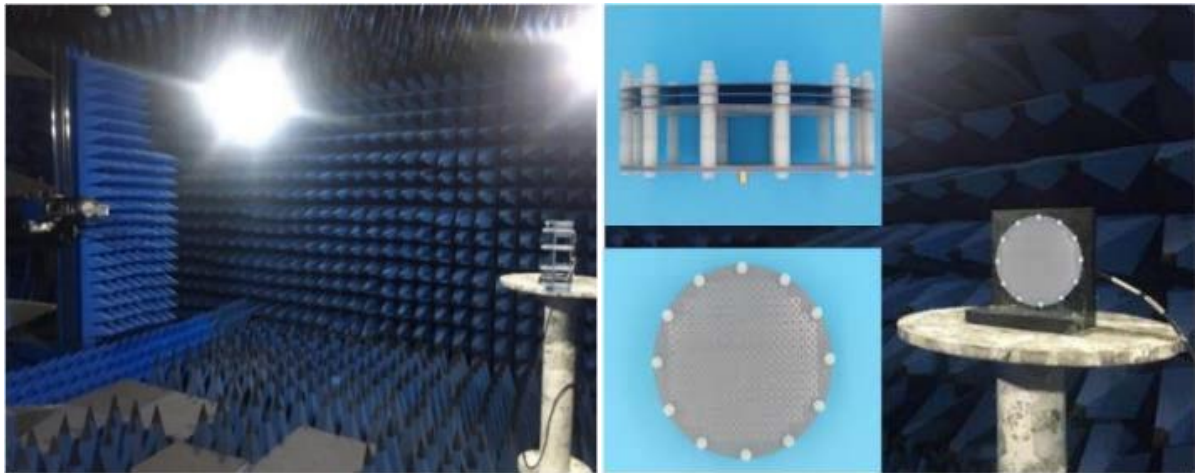
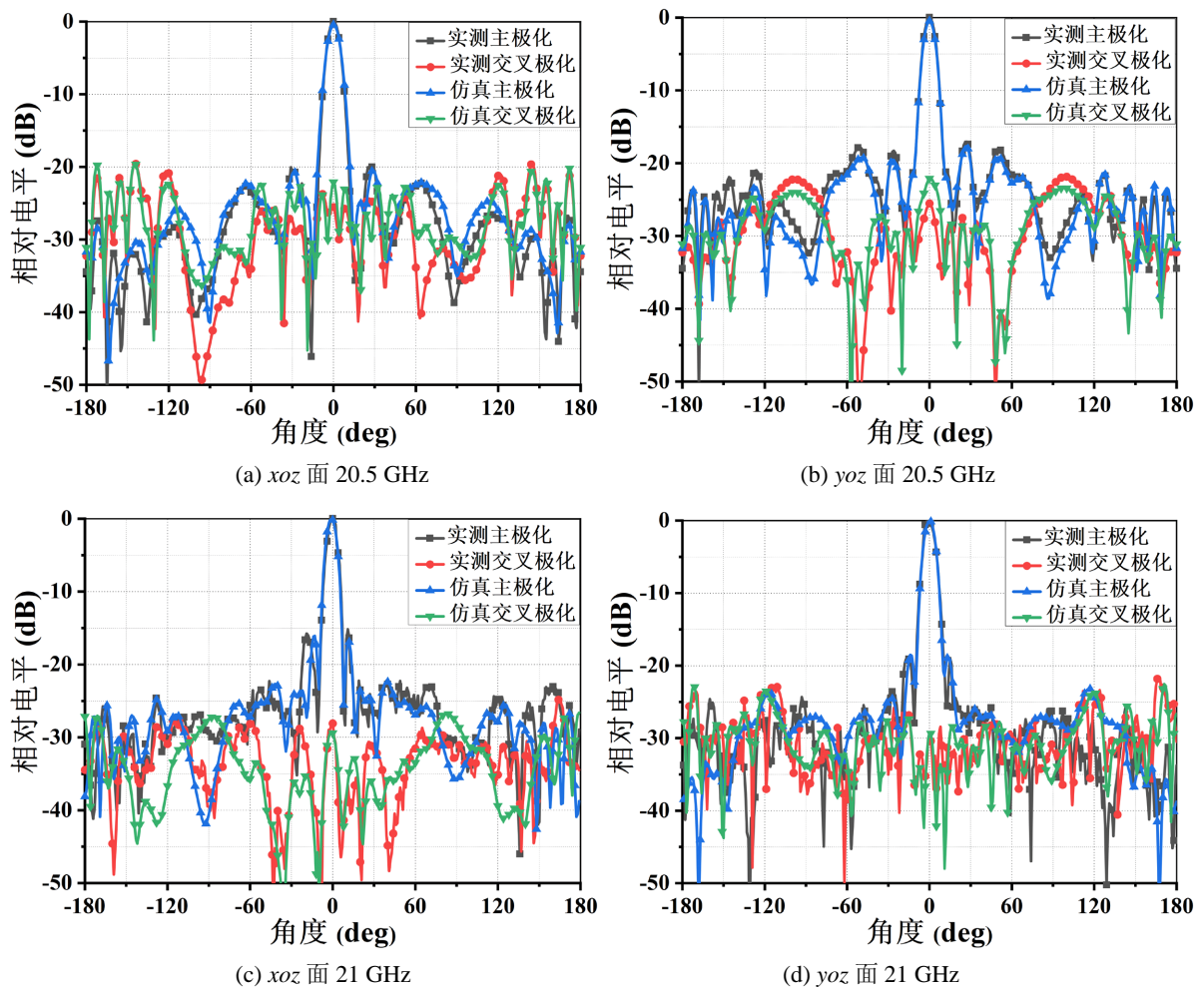


Figure 8. Photographs of the folded transmitarray under test in a microwave chamber
图 8. 折叠传输阵天线在微波暗室的测试照片



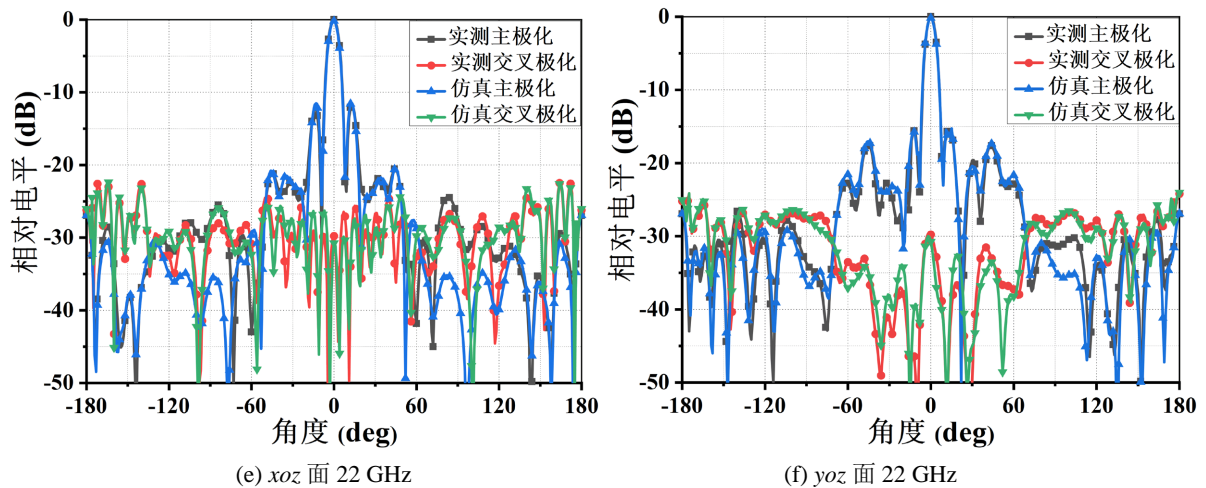


Figure 9. Simulated and measured normalized radiation patterns of the proposed folded transmitarray
图 9. 折叠传输阵在不同频点处的仿真和实测方向图

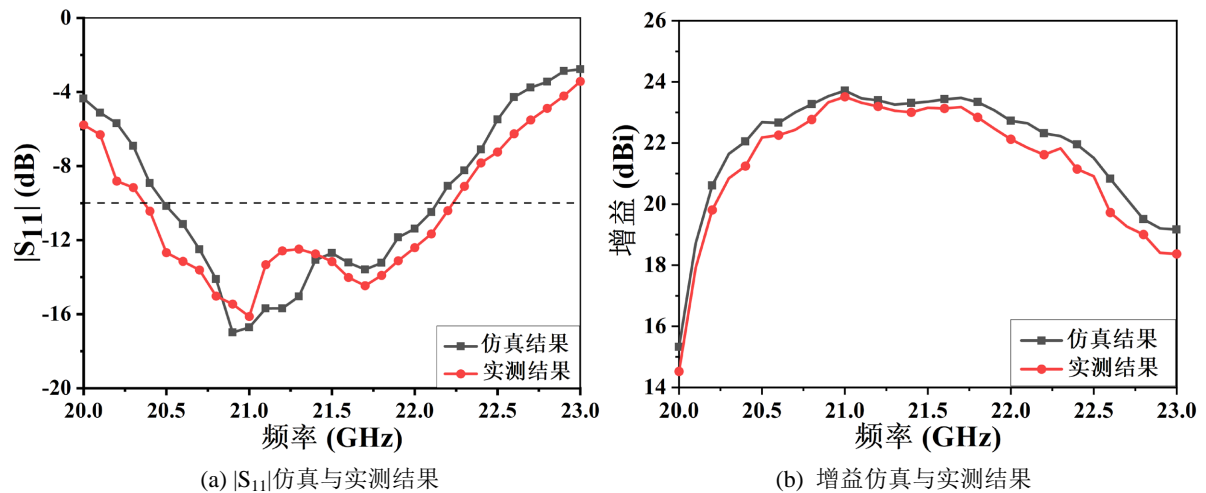


Figure 10. Simulated and measured results of the folded transmitarray antenna
图 10. 折叠传输阵的 $|S_{11}|$ 和增益的仿真与实测结果

Table 3. Comparison of the proposed antenna with other works
表 3. 该天线与其他工作的比较

Ref.	[2]	[7]	[8]	[9]	This work
频率(GHz)	30	21	28	27	21
口径尺寸	12.6λ	13.3λ	4.6λ	16λ	7.3λ
纵向高度	11.3λ	20λ	2.2λ	4.75λ	2.3λ
1-dB 增益带宽	7.5%	9.6%	5%	6.3%	7%
辐射效率	36%	40%	46%	13.8%	39%
增益	28.6 dBi	29.4 dBi	23 dBi	25.2 dBi	23.8 dBi

3. 结论

本文介绍了一款基于多层频率选择表面的宽频带折叠传输阵天线。该天线包含上层加载线极化栅的

平面传输阵面、下层宽带极化扭转反射表面以及平面微带贴片阵列馈源。首先, 提出并设计了一款加载线极化栅的三层双环传输阵单元, 它可以反射一种线极化波, 同时透射另一种与之正交的线极化波。其次, 设计了一款宽带反射型极化扭转单元, 它可以把一种线极化波扭转为与之正交的另一线极化波。由于线极化栅和反射型极化扭转单元的存在, 上层传输阵面与下层极化扭转反射阵面之间的距离缩减为等效馈源与平面传输阵之间距离的三分之一。最后, 加工制作该折叠传输阵。实测结果显示, 该天线获得了 7% 的 1-dB 增益带宽, 天线在中心频点 21 GHz 处获得了最大增益 23.8 dBi, 辐射效率为 39%。

参考文献

- [1] Pozar, D.M. (1996) Flat Lens Antenna Concept Using Aperture Coupled Microstrip Patches. *Electronics Letters*, **32**, 2109-2111. <https://doi.org/10.1049/el:19961451>
- [2] Ryan, G.M., Chaharmir, M.R., Shaker, J., Bray, J.R., Antar, Y.M. and Ittipiboon, A.A. (2010) Wideband Transmitarray Using Dual-Resonant Double Square Rings. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **58**, 1486-1493. <https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2044356>
- [3] Abdelrahman, A.H., Elsherbeni, A.Z. and Yang, F. (2014) High-Gain and Broadband Transmitarray Antenna Using Triple-Layer Spiral Dipole Elements. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **13**, 1288-1291. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2334663>
- [4] Palma, L., Clemente, A. and Dussopt, L. (2015) Circularly Polarized Transmitarray with Sequential Rotation in Ka-Band. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **63**, 242-250. <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2474149>
- [5] Pham, K.T., Sauleau, R. and Fourn, E. (2015) Dual-Band Transmitarrays with Dual-Linear Polarization at Ka-Band. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **65**, 7009-7018. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2762011>
- [6] An, W., Xu, S., Yang, F. and Li, M. (2016) A Double-Layer Transmitarray Antenna Using Malta Crosses with Vias. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **64**, 1120-1125. <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2513427>
- [7] Yi, X.J., Su, T., Li, X., Wu, B. and Yang, L. (2019) A Double-Layer Wideband Transmitarray Antenna Using Two Degrees of Freedom Elements around 20 GHz. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **67**, 2798-2802. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2893265>
- [8] Fan, C., Che, W.Q. and Yang, W.C. (2017) A Novel PRAMC-Based Ultralow-Profile Transmitarray Antenna by Using Ray Tracing Principle. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **65**, 1779-1787. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2670600>
- [9] Ge, Y.H., Lin, C.X. and Liu, Y.J. (2018) Broadband Folded Transmitarray Antenna Based on an Ultrathin Transmission Polarizer. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **66**, 5974-5981. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2863121>
- [10] Wu, G.B., Qu, S.W. and Yang, S.W. (2019) Low-Profile Transmitarray Antenna with Cassegrain Reflectarray Feed. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **67**, 3079-3087. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2899029>