

一种可应用于射电天文的小型化超宽带馈源喇叭设计*

濮正微^{1,2†} 仲伟业^{2,3‡} 申明¹ 言卓瑛^{2,4}

(1 上海大学理学院 上海 200444)

(2 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(3 射电天文与技术全国重点实验室 北京 100101)

(4 广西大学物理科学与工程技术学院 南宁 530004)

摘要 设计了一种小型化超宽带馈源喇叭, 采用了开放边界式的四脊喇叭结构, 并在馈电反射腔处借鉴了 Vivaldi 天线的反射腔形式, 通过加大反射腔尺寸来延长低频表面电流的循环路径, 改善低频辐射性能, 实现了馈源整体尺寸的小型化. 相比于传统四脊喇叭, 其尺寸缩小了约 2/3, 为 $0.45\lambda_0 \times 0.45\lambda_0 \times 0.35\lambda_0$, λ_0 为工作频段内最低频的波长. 该超宽带馈源的工作频率为 2.2 – 16 GHz, 测试结果显示, 除一端口反射系数因装配误差导致在 6 GHz 处偏离仿真结果外, 两端口的反射系数在工作频段内始终小于 -8 dB. 天线口径效率的仿真结果均大于 40%. 该馈源适用于对尺寸重量有严格需求的空间科学领域.

关键词 仪器: 望远镜, 技术: 雷达天文, 仪器: 馈源

中图分类号: P111; **文献标识码**: A

1 引言

在射电天文学中, 2.2 – 16 GHz 频段具有重要意义, 该频段覆盖了探测天文射电辐射源的 S、C、X、Ku 4 个关键波段, 如脉冲星、星际分子谱线和活动星系核等, 是研究星际介质和星系结构的重要频段. 且相比于更低频段, 2.2 – 16 GHz 频段受地面无线电干扰相对较小, 有利于获取更高质量的天文信号.

随着甚长基线干涉测量 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) 技术的不断发展及对更微弱宇宙射电源的探测需求, 研究人员越发希望能

够突破地球直径的限制, 进一步拓展基线长度, 从而提出了空间 VLBI 的概念, 即将射电望远镜发射至空间中, 与地面或空间中其他射电望远镜组成空间 VLBI 网, 可实现远超地球尺寸的基线长度. 空间发射器有限的负载能力便是空间 VLBI 面临的诸多挑战之一, 因此空间射电望远镜的重量和体积必须严格控制, 这对馈源的设计提出了小型化和轻量化的要求. 传统超宽带馈源喇叭^[1–3]整体尺寸偏大, 不仅会对反射面造成较大的口径遮挡, 减少接收到的射电信号, 导致天线效率下降^[4], 配套的致冷杜瓦还会极大地增加接收机整体的重量和体积. 因此, 对超宽带小型化馈源喇叭进行研究具

2024-12-30 收到原稿, 2025-04-07 收到修改稿

* 基准专项 (JZZX-01) 资助

† pzw@shao.ac.cn

‡ wyzhong@shao.ac.cn

有重要的意义,如何在需求频带内牺牲最少的性能、实现更小的馈源尺寸及重量是空间应用馈源喇叭技术的重点发展目标之一。

当前常用的馈源喇叭形式有对数周期馈源、Eleven馈源、四脊喇叭馈源和Vivaldi阵列等^[5]。其中,对数周期馈源结构简单,可实现较宽的工作频带,但其插损较大,易影响天线照射效率,且虽与辐射方向垂直包络较小但沿辐射方向长度过长,不适用于对体积重量有严格要求的空间应用^[6-9]。Eleven馈源在十倍频内具有恒定的波束宽度和稳定的相位中心,且辐射方向尺寸远小于对数周期馈源,但其天线的馈电部分比较复杂,需要多端口馈电,这限制了其在高频上的应用^[10-13]。当前超宽带馈源的主流选择为四脊喇叭馈源,其采用同轴馈电、馈电方式简单且插损较小,并可通过不同设计来控制其波束宽度在较大范围内可变,适合运用于不同口径大小的反射面天线^[14-20]。Vivaldi天线具有结构简单、成本较低、阻抗带宽较宽的特点,其阻抗带宽与辐射特性受实际加工误差的影响较小。但Vivaldi天线通常由薄金属或印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)制成,机械结构强度较弱,易受外部环境的影响,不适用于空间应用^[21-25]。

研究者们提出了多种方法在不过度牺牲馈源性能的情况下减小其尺寸。2021年, Fagnoni等^[26]曾为赫拉射电望远镜阵列(Hydrogen Epoch of Reionization Array, HERA)提出一种低成本、小型化、超宽带馈源喇叭的设计,覆盖50–250 MHz 5倍频带宽。相较于传统同频段四脊喇叭3 m的口径, Fagnoni等^[26]提出的新型Vivaldi天线最大口径仅为1.82 m,且反射系数 S_{11} 在700 MHz范围内均低于-7 dB。2023年, MacKay等^[27]又在此基础上进行了改进,可覆盖0.3–1.5 GHz 5倍频带宽的馈源喇叭在全工作频带内 S_{11} 均小于-10 dB,且口径效率稳定在40%–60%,目前已在宇宙起源射电深视场探测阵列(Canadian Hydrogen Observatory and Radio-transient Detector, CHORD)中投入使用。为提升馈源性能, Flygare等^[28-29]使用了加载介质棒^[30]的方法,改变了馈源的场分布、优化了其交叉极化,大幅提升了所设计1–20 GHz馈源的口径效率,从原有的38%提升至62%,原型

馈源已安装至艾伦望远镜阵列(Allen Telescope Array, ATA)进行测试。

本文基于对现有超宽带馈源的研究和分析,设计了一款小型化的超宽带馈源,该馈源工作于2.2–16 GHz,尺寸为62 mm×62 mm×48.4 mm,仅为传统同频段馈源喇叭尺寸的1/3,重量为66.7 g。对比仿真与实物加工测试结果表明,该馈源的性能均达到预期指标。

2 小型化馈源喇叭结构设计

本文设计的小型化馈源喇叭采用了开放边界式的四脊喇叭结构,并在馈电反射腔处借鉴了Vivaldi天线的反射腔形式。馈源实物如图1所示,整个馈源主要由4个部分组成:(1)两个正交的脊片;(2)用于定位脊片及反射背向辐射的反射板;(3)提高口径效率的加载介质棒;(4)固定脊片及加载介质棒的支撑板。两个脊片除馈电处有沿辐射方向上的位置偏移外,其余部分均完全相同。

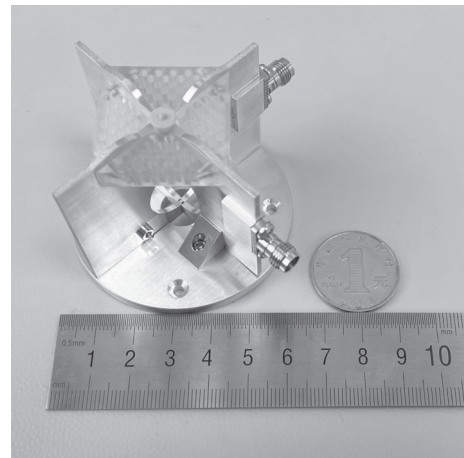


图 1 馈源喇叭实物图

Fig. 1 The photograph of the feed horn

脊片的具体轮廓如图2所示,由以下5部分组成:(1)样条曲线(Spline)辐射面,其取点值详见表1;(2)用于安装馈电探针的直线段,长度为 L_s ,宽度为 W_s ;(3)圆形反射腔,直径为 d_{BS} ;(4)用于在反射板上精确定位的凸起结构;(5)用于进行安装的外轮廓,最终宽度为 W ,高度为 H 。仿真优化结果表明,脊片厚度越薄,馈源总体性能越好。考虑

加工同轴馈电孔位的可行性, 经仿真优化验证, 最终选用脊片厚度为1.6 mm, 可在工艺限制内实现最佳的辐射性能。

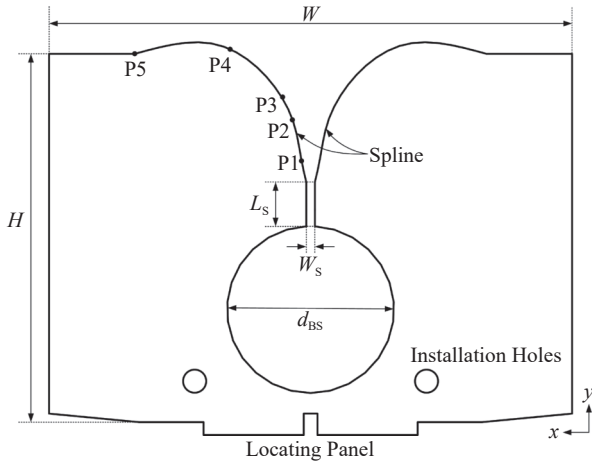


图 2 馈源喇叭脊片轮廓示意图

Fig. 2 Diagram of the ridge profile for the feed horn

表 1 Spline取点值
Table 1 Points for spline ridge

Points	(x, y)
P1	(0.46, 2)
P2	(1.50, 7)
P3	(2.92, 10)
P4	(10.15, 16)
P5	(19.04, 15)

与常见的四脊馈源喇叭的矩形、锥形、阶梯型反射腔不同, 本设计采取了圆形反射腔, 直径约为最大波长的1/8. 2016年, Wu等^[31]提出了用增加短截线的方式拓展了低带宽的限制, 实现了尺寸的小型化; 2023年, MacKay等^[27]又在此基础上创新性地提出了加大反射腔尺寸的方法, 在拓宽波束的同时保持了馈源的小尺寸. 本设计采用了加大圆形反射腔直径的方法, 可以有效减少后向辐射, 使馈源在2.2 – 16 GHz的频率范围内表现出相对稳定的反射特性, 并在低频保持相对较好的性能。

反射板安装于最底部, 其上开有用于限位两

个正交脊片的凹槽, 以确保装配误差控制在容差范围内, 避免任何因此产生的性能恶化. 此外, 反射板上还设置有4个螺纹孔, 用于固定脊片. 反射板与脊片材料均选用常见的铝合金(AL6061-T6)材料, 该材料具有高导电性、高强度、轻量化、价格低廉的特点, 充分满足了高性能和低成本的双重要求。

加载介质棒结构如图3所示, 也采用Spline曲线进行设计, 顶部带有一个直径为 D_{die} , 厚度为 t_{rt} 的突出的圆盘, 用于固定介质棒. 底部插入脊片缝隙部分的长度为 L_{insert} , 直径为 D_{insert} . 圆盘可卡于支撑板上, 并通过胶水加以固定. 本设计采用PEEK900材料, 相比于空气, 该介质材料具有更高的介电常数, 为3.0 – 3.2. 加载介质棒会改变原有馈源的场分布, 从而优化整个馈源的方向图, 使其具备更优异的方向性, 并将平均口径效率由38%提升至48%。

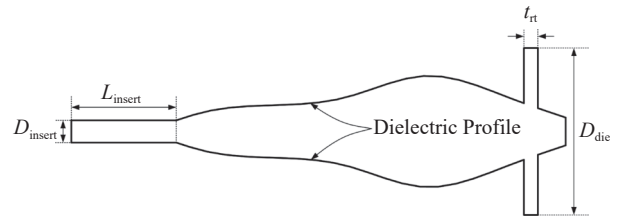


图 3 加载介质棒轮廓示意图

Fig. 3 Diagram of the loaded dielectric rod profile

正交脊片顶端还安装有一块亚克力板, 用于支撑脊片并提供加载介质棒的安装位置. 亚克力板质量轻、机械强度适中, 具有良好的抗压、抗拉强度. 作为电绝缘体, 亚克力板的介电常数约为2.5 – 3.0, 在低频(S、C频段)损耗较小, 可以有效避免在辐射方向上影响馈源的方向图及反射系数. 为抑制亚克力板在高频(X、Ku频段)对馈源方向性的影响, 可以通过在板上打孔或减小板材厚度的方式, 来降低等效介电常数, 减少方向图畸变. 考虑到其作为支撑板的厚度需求, 本文采用了在板上均匀分布打孔的方式, 兼顾了机械稳定性和电性能。

本设计采用同轴馈电方式, 为实现50 Ω 阻抗匹配, 内导体直径为0.23 mm, 空气柱直径为0.52

mm. 该馈电方式因其结构简单、成本低廉、易于实现匹配等优点, 广泛应用于宽带天线设计中, 如喇叭天线和微带天线等. 为保证探针与脊片相连, 在脊片另一侧处开设一个略大于内导体直径的孔用以固定. 两同轴探针相互正交放置, 为在保证两端口驻波比相当的同时实现较好的隔离度, 通过仿真, 两者间距离最佳设计值为0.62 mm. 综合考虑工作频段、反射系数、天线增益及波束宽度等, 最终设计的馈源喇叭的尺寸参数如表2所示.

表 2 馈源喇叭设计参数值
Table 2 Design parameters for the feed horn

Description	Notation	Value/mm
Backshort diameter	d_{BS}	21.5
Untapered slot width	W_s	1.2
Air-filled hole diameter for SMA connector	d_A	0.52
Pin diameter for SMA connector	d_{pin}	0.23
Petal width	W	62
Petal height	H	48.4
Reflection plate diameter	D_{RF}	30
Dielectric rod insertion diameter	D_{insert}	0.8

3 小型化馈源喇叭实物加工与测试

根据仿真模型, 采用铝板切割工艺对小型化馈源喇叭进行了加工制作. 加工后馈源整体尺寸为62 mm×62 mm×48.4 mm. 使用Keysight N9950A 矢量网络分析仪对小型化馈源喇叭的散射参数(Scattering Parameter, S参数)进行了测量, 其S参数仿真与实测结果如图4所示, 灰色阴影部分为工作频段. 可以看出, 在2.2 – 16 GHz的工作频段范围内, 该馈源端口1和端口2仿真得到的反射系数 S_{11} 、 S_{22} 均小于-8 dB. S_{11} 实测结果除在5 – 6.4 GHz范围内偏离仿真结果外, 其余均与仿真结果吻合较好, 在2.4 – 5 GHz及6.4 – 20 GHz均小于-8 dB. S_{22} 实测结果与仿真结果的变化趋势基本一致, 但实测值整体有所抬升, 在2.4 – 20 GHz内均小于-8 dB. 此外, 该馈源两个端口的隔离度

(S_{12} 、 S_{21})在2.2 – 16 GHz的工作频段范围内全部优于-26 dB.

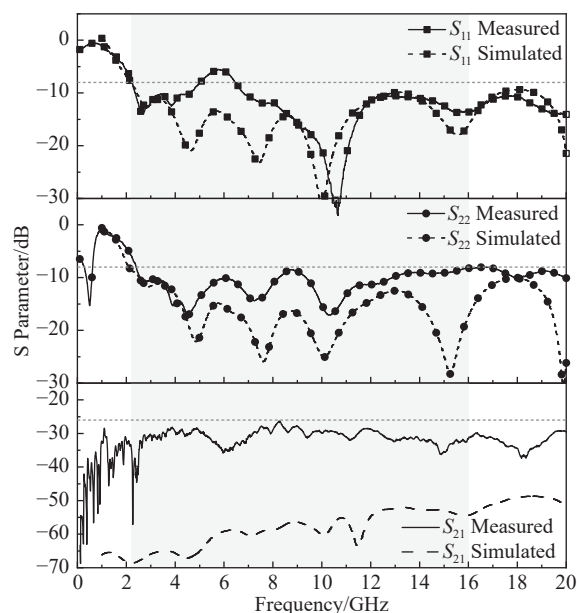


图 4 S参数仿真与实测结果

Fig. 4 Simulated and measured results of S parameters

为验证 S_{11} 在6 GHz附近性能恶化的原因, 使用游标卡尺对加工实物进行了测量, 除探针因悬浮原因无法准确测量外, 各尺寸均在容差范围内. 对探针位置误差进行了仿真模拟验证, 结果显示探针在偏离同轴圆心0.1 mm时 S_{11} 会在6 GHz附近大幅抬升, 因此推测 S_{11} 在6 GHz附近性能恶化的主要原因为固定探针孔位的加工误差导致实物装配时产生的探针位置偏移.

为了验证该小型化馈源喇叭的辐射特性, 在微波暗室环境下对其远场辐射方向图进行测试, 测试场景如图5所示.

馈源在2 GHz、5 GHz、9 GHz、12 GHz和16 GHz时的共极化仿真与测试结果如图6所示, 左列为E面(和电场共面的辐射平面)归一化结果, 右列为H面(和磁场共面的辐射平面)归一化结果, 实线为共极化实测结果, 虚线为共极化仿真结果. 除低频2 GHz外, 馈源共极化的仿真结果与测试结果均基本吻合. 这是由于测试线缆伸出长度对方向图测试结果有较大影响, 为降低该负面影响, 采用直

角转接头进行测试线缆连接,并用吸波材料对线缆进行包裹,但吸波材料也会对方向图产生影响,所以2 GHz处方向图测试结果较仿真结果差异较大. 馈源D面(和E面成45°夹角的辐射平面)归一化辐射方向图仿真与测试结果如图7所示,黑色实线为共极化实测结果,黑色虚线为共极化仿真结果,灰色实线为交叉极化实测结果. 该小型化馈源喇叭整体波束较宽,适用于焦径比较小的深反射面天线.

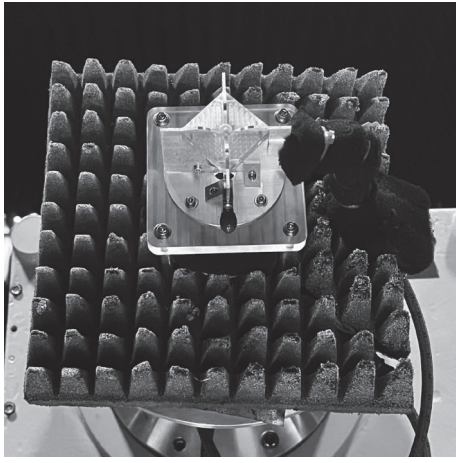


图 5 微波暗室测试环境

Fig. 5 Anechoic chamber test environment

为确认焦径比对本文设计的小型化超宽带馈源喇叭口径效率的影响,通过仿真得到了不同焦径比 f/D 下各个频点的增益值 G ,并代入口径效率计算公式^[27]:

$$\eta_A = \frac{A_{\text{eff}}}{A_{\text{phys}}} \quad , \quad (1)$$

$$A_{\text{eff}} = \frac{\lambda G^2}{4\pi} \quad , \quad (2)$$

$$A_{\text{phys}} = \pi R^2 \quad , \quad (3)$$

其中 A_{eff} 和 A_{phys} 分别为有效口径和物理口径, λ 为波长, R 为反射面半径. 不同焦径比下的口径效率计算结果如图8所示. 对比发现,焦径比越小,低频(2–6 GHz)口径效率越高,而高频(8–16 GHz)口径效率越差;相反,焦径比越大,高频口径效率提升,此时低频口径效率降低. 经分析,造成这种

结果的原因为: 低频的半张角较宽而高频半张角较窄,所以反射面越深,也就是焦径比越小,低频的口径效率越优异,高频则与之相反. 为在全频带内实现较为稳定的口径效率,选取最合适的焦径比值为 $f/D = 0.30$,此时全频带的平均口径效率约为48%.

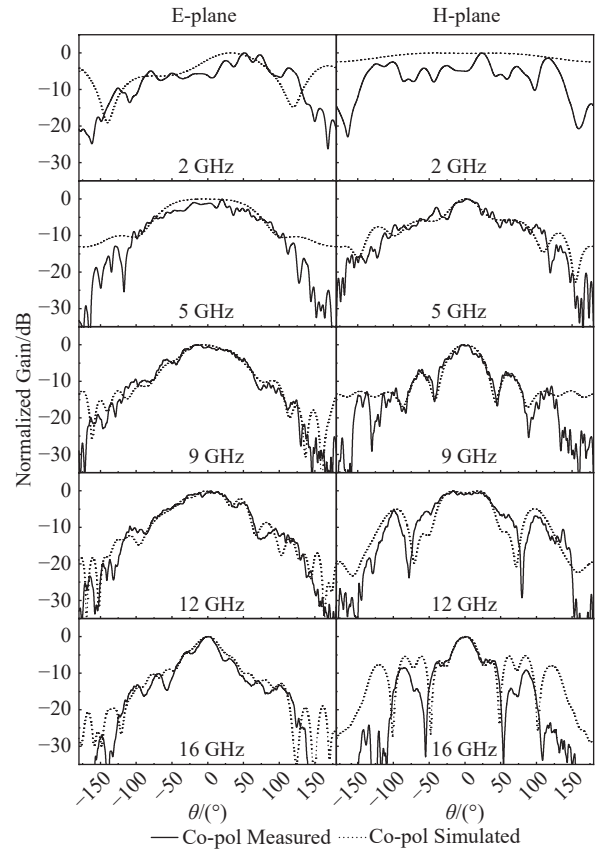


图 6 E面和H面共极化仿真与实测结果

Fig. 6 Simulated and measured co-polarization results on E-plane and H-plane

表3对比了本文设计的小型化超宽带馈源喇叭与其他相近频段的馈源喇叭的主要特性及相对于工作频段内最低频波长 λ_0 的尺寸. 从表中可以看出,相比于其他馈源,本文设计的馈源喇叭尺寸显著缩小,其整体体积较传统四脊喇叭减少了约2/3.在不牺牲过多性能的情况下,大幅降低了尺寸和重量,使之在现代空间科学领域具有很大的竞争优势.

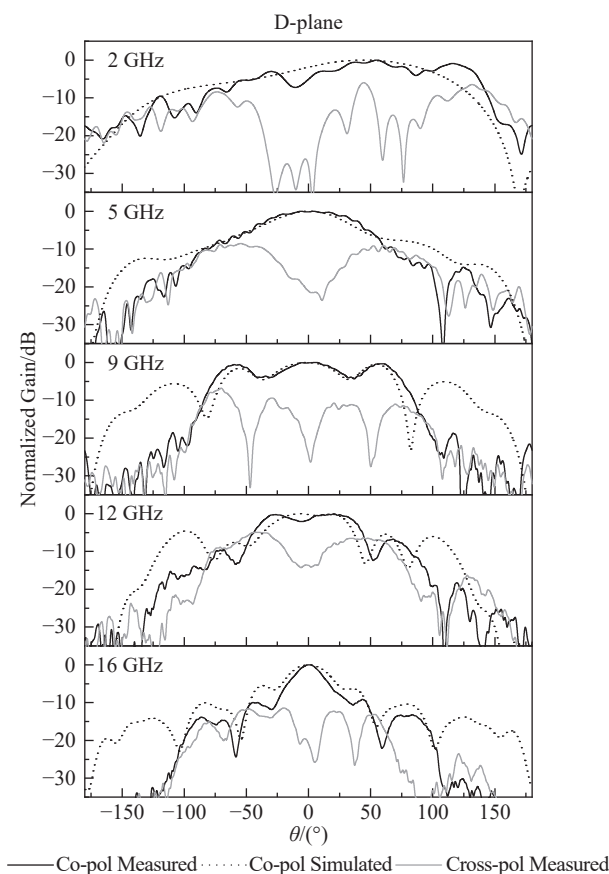


图 7 D面仿真与测试归一化辐射方向图

Fig. 7 Simulated and measured normalized radiation patterns on D-plane

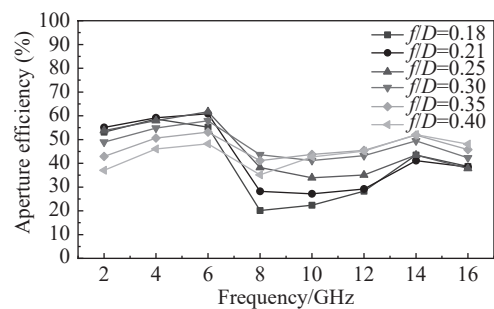


图 8 不同焦距比下的口径效率

Fig. 8 Aperture efficiency with various focal ratios

小型化超宽带馈源不仅能实现超宽频带覆盖,满足多种频段的天文观测需求,还能够减轻接收机重量、减少体积,降低发射成本,为微小卫星或立方星等提供更多灵活性.本文设计的馈源可应

用于对包络尺寸和整体载荷重量有严格指标要求的现代空间任务,推动空间天文观测技术向更高的精度和更广泛的应用领域发展.

表 3 不同馈源主要特性对比
Table 3 Comparison of key characteristics among different feeds

Reference	Bandwidth /GHz	λ_0 /mm	$W \times H / \lambda_0$	η_A	Reflection Coefficient /dB
[15]	2 – 6 (6:1)	150	1.14×1.04	0.5	< –10
[16]	2 – 12 (6:1)	150	1.4×1.07	0.55	< –6
[18]	2.4 – 24 (10:1)	125	1.5×0.68	0.55	< –10
[20]	2.2 – 14 (6.4:1)	136	1.39×0.79	0.55	< –10
This work	2.2 – 16 (7.3:1)	136	0.45×0.35	0.48	< –8

4 结论

本文采用开放边界式的四脊喇叭结构,通过加大圆形反射腔,实现了一种小型化的超宽带馈源喇叭.实测结果表明,两端口的反射系数均小于–8 dB,覆盖了期望的应用工作带宽2.2 – 16 GHz.全频带的平均口径效率约为48%,适用于深反射面天线.本文设计的馈源体积小、重量轻、结构紧凑,在对尺寸重量有严格要求的现代空间科学领域具有很高的使用价值和广泛的应用前景.

参考文献

[1] Olver A D, Clarricoats P J, Kishk A A, et al. Microwave Horns and Feeds. New York: Institution of Electrical Engineers, 1994: 123-124
[2] Silver S. Microwave Antenna Theory and Design. London: McGraw-Hill Book Company Inc, 1949: 347-349

- [3] 钟顺时. 天线理论与技术. 北京: 电子工业出版社, 2011: 346-355
- [4] Ko W, Mittra R, Lee S. ITAP, 1984, 32: 282
- [5] 伍洋, 杜彪, 马军. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17: 641
- [6] DuHamel R, Isbell D. 1958 IRE International Convention Record. New York: Institute of Radio Engineers, 1957, 5: 119-128
- [7] Ericsson D, Kildal P S, Weinreb S. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium Digest. Columbus: IEEE, 2003, 1: 241-244
- [8] Sushko O, Pilyay S, Dubrovka F. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv: IEEE, 2020: 222-225
- [9] Raju S, Goud S H V, Jahangeer S, et al. Proceedings of 2023 International Conference on Computational Intelligence for Information, Security and Communication Applications. Bengaluru: IEEE, 2023: 30-34
- [10] Karandikar Y B, Yang J, Kildal P S. Proceedings of the 4th European Conference on Antennas and Propagation. Barcelona: IEEE, 2010: 1-5
- [11] Haddadi A, Taghikhani P, Yang J, et al. Proceedings of the 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation. Davos: IEEE, 2016: 1-5
- [12] Tang W, Qu S W, Yang S. IAWPL, 2020, 19: 1600
- [13] Ji C C, Wu Y, Wang N, et al. Proceedings of SPIE, 2024, 13283: 1328357
- [14] Akgiray A H. New Technologies Driving Decade-Bandwidth Radio Astronomy: Quad-Ridged Flared Horn and Compound-Semiconductor LNAs. Pasadena: California Institute of Technology, 2013: 3-5
- [15] Akgiray A, Weinreb S, Imbriale W A, et al. ITAP, 2012, 61: 1099
- [16] Beukman T S, Meyer P, Ivashina M V, et al. ITAP, 2016, 64: 1615
- [17] Dong B, Yang J, Dahlström J, et al. ITAP, 2018, 67: 585
- [18] Ma Y, See C H, Pang F, et al. IEEEEA, 2020, 8: 81101
- [19] De Villiers D, Lehmentsiek R, Mokhupuki F. Proceedings of the 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation. Copenhagen: IEEE, 2020: 1-4
- [20] García-Pérezó, Tercero F, Baldominos A, et al. IEEEEA, 2024, 12: 10
- [21] Gibson P J. 1979 9th European Microwave Conference. Brighton: IEEE, 1979: 101-105
- [22] Kumar R, Behera B R, Suraj P. Proceedings of 2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation. Hyderabad: IEEE, 2018: 1-4
- [23] Dixit A S, Kumar S. IEEEEA, 2020, 8: 45774
- [24] Yin J, Li J, Tan D, et al. Proceedings of 2021 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium. Chengdu: IEEE, 2021: 1-2
- [25] Lv Y, Qian J, Kong F, et al. Proceedings of 2022 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Harbin: IEEE, 2022: 1-3
- [26] Fagnoni N, de Lera Acedo E, Drought N, et al. ITAP, 2021, 69: 8143
- [27] MacKay V, Lai M, Shmerko P, et al. JAI, 2023, 12: 2350008
- [28] Flygare J, Pantaleev M. ITAP, 2019, 68: 207
- [29] Flygare J, Yang J, Pollak A W, et al. ITAP, 2023, 71: 2110
- [30] Satoh T. ITAP, 1972, 20: 199
- [31] Wu J, Zhao Z, Liu Q H. MiOTL, 2015, 57: 983

Design of a Miniaturized Ultra-wideband Feed Horn for Radio Astronomy Applications

PU Zheng-wei^{1,2} ZHONG Wei-ye^{2,3} SHEN Ming¹ YAN Zhuo-ying^{2,4}

(1 College of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444)

(2 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

(3 State Key Laboratory of Radio Astronomy and Technology, Beijing 100101)

(4 School of Physical Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004)

ABSTRACT This paper presents the design of a miniaturized ultra-wideband feed horn, which adopts an open-boundary quad-ridged horn structure. The backshort cavity at the feeding section is inspired by the Vivaldi antenna's reflective cavity design. By enlarging the cavity, the circulation path for surface currents at low frequencies is extended, which improves low-frequency radiation performance, thereby achieving a reduction in size. Compared to conventional quad-ridged horns, the proposed design reduces the size by approximately two-thirds to $0.45\lambda_0 \times 0.45\lambda_0 \times 0.35\lambda$, where λ_0 is the wavelength at the lowest operating frequency. The ultra-wideband feed operates at 2.2 – 16 GHz. Test results indicate that, besides a deviation near 6 GHz caused by assembling errors, the reflection coefficients at both ports remain below –8 dB across the entire operating band. Simulated results show that the aperture efficiency of the antenna exceeds 40% throughout the operating bandwidth. This feed horn is suitable for space science applications with strict requirements on size and weight.

Key words instrumentation: telescopes, techniques: radar astronomy, instrumentation: feed