

# 宽带相控阵馈源可展开反射面天线研究

薛裕晓, 沈永健, 张峪维, 李 敏, 刘 昊  
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 为满足星载高增益天线的应用需求, 本文设计了一种带有相控阵馈源的伞状可展开反射面天线。首先介绍了反射面天线可展开机构的原理及设计, 由碳纤维天线肋和金属编织网面组成反射面, 在高精度可展开机构的动作下实现其收拢和展开, 从而大幅减小其收藏包络尺寸。对于直径为 1.14 m 的可展开反射面天线设计了宽带相控阵馈源, 采用金属 Vivaldi 天线作为相控阵单元, 根据极化方式、焦距比和扫描范围选择排列成双极化矩形阵列, 使可展开反射面天线在 8~16 GHz 内实现二维波束扫描, 通过电磁仿真进行验证, 仿真结果表明, 宽带相控阵馈源能够有效地增加可展开反射面天线的视场, 反射面天线在 8 GHz、12 GHz 和 16 GHz 时扫描到 0° 的增益分别是 38.03 dB、40.65 dB 和 41.48 dB, 扫描到 +3° 的增益分别是 37.68 dB、40.68 dB 和 41.09 dB。

**关键词:** 可展开结构; 反射面天线; 相控阵馈源; 波束扫描

**中图分类号:** TN82; V443+.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)01-0072-07

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20220402001

**引用格式:** 薛裕晓, 沈永健, 张峪维等. 宽带相控阵馈源可展开反射面天线研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(1): 72-78.

## A broadband deployable reflector antenna with phased array feed

XUE Yuxiao, SHEN Yongjian, ZHANG Yuwei, LI Min, LIU Hao  
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** An umbrella-shaped deployable reflector antenna with phased array feed is designed to meet the requirements of spaceborne high-gain antenna in this paper. Firstly, the principle and design of the deployable mechanism of reflector antenna are introduced. The reflector consists of carbon-fiber rib and braided metal net, which can be closed and expanded under the action of the high-precision deployable mechanism, thus greatly reducing the size of the collection envelope. A wideband phased array feed is designed for the 1.14-meter aperture deployable reflector antenna, and the metal Vivaldi antenna is used as the element of the phased array. According to the polarization mode, the reflector  $f/D$  and scanning range, a rectangular dual-polarized Vivaldi array is arranged and used, realizing a two-dimensional scanning range in the frequency range of 8~16 GHz. Simulation results show that antenna gain at 8 GHz, 12 GHz, 16 GHz is 38.03 dB, 40.65 dB and 41.48 dB scanning to 0°, and 37.68 dB, 40.68 dB and 41.09 dB scanning to +3° respectively, validating the wideband phased array feed can effectively increase the field of view of the deployable reflector antenna.

**Keywords:** Deployable structure; Reflector antenna; Phased array feed; Beam scanning

**Citation:** XUE Yuxiao, SHEN Yongjian, ZHANG Yuwei, et al. A broadband deployable reflector antenna with phased array feed [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(1): 72-78.

## 引 言

可展开天线能够有效解决空间大口径天线需求和运载工具承载限制这一典型矛盾, 近年来已被广泛研究<sup>[1-3]</sup>。设计高精度、大折展比的大口径可折叠反射面天线, 可以有效解决运载尺寸限制的问题, 另一方面通过可展开机构将反射面精确

地展开为工作状态, 保持在空间的电性能基本不变。对于空间可展开反射面天线, 根据其折展结构的形式, 主要常见的形式有固面可展开天线、网状可展开天线、充气可展开天线<sup>[4]</sup>。

由于具有高增益、高效率等特点, 反射面天线广泛应用于地面测控站、卫星通信及射电天文等领域。反射面天线高增益的特点往往意味着其

波束宽度非常窄,导致其视场范围较窄。通常可以通过机械扫描和电扫描两种方式来扩大天线的视场范围,其中电扫描以其扫描迅速灵活等特点被广泛研究。电扫描可以通过相控阵天线、多波束天线<sup>[5]</sup>等形式实现。将相控阵天线作为反射面天线的馈源,可以控制相控阵的激励来实现反射面天线的波束扫描,有效地扩大其视场范围。相控阵馈源(Phased Array Feed, PAF)已广泛应用为反射面天线的馈源,这种方式能够将反射面天线高增益的特点和相控阵天线波束扫描灵活的特点相结合,形成多个连续覆盖的波束或特定形状的赋形波束。为了实现阵列天线作为馈源的反射面天线波束扫描,有学者提出了共轭场匹配法(Conjugate Field Method, CFM),基于遗传算法的综合算法<sup>[6]</sup>,快速稳健的致密焦面阵列馈源设计方法<sup>[7]</sup>以及星载大口径反射面天线的多波束设计方法<sup>[8]</sup>等。文献[9]研究了反射面天线焦面场最优采样时PAF的参数选取原则,并给出了工作频率在4~7 GHz内PAF的设计和分析。文献[10]研究了在固定单元数量的情况下,超方向性单元的单元间距随射电望远镜巡天速度的变化规律。文献[11]设计了工作在1.4 GHz的高灵敏度19元簇型双极化偶极子PAF,用于绿岸射电天文望远镜。文献[12]提出了一种工作在4~8 GHz的4×6元矩形紧馈双极化蝶形偶极子PAF,以满足平方公里阵列射电望远镜(Square Kilometer Array, SKA)的要求。文献[13]分析了PAF的阵列排列方式、阵列规模、阵元间距等参数对灵敏度的影响,并设计了工作在1~1.5 GHz的宽带双极化微带偶极子PAF,以满足五百米口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope, FAST)的系统要求。文献[14]分析了焦面场与馈源口径场的联系,建立了基于焦面场分析进行PAF设计的方法,并设计PAF实现了波束赋形的效果。文献[15]基于上海65米射电望远镜,设计了6~9 GHz的矩形排列Vivaldi形式PAF。文献[16]基于FAST的要求,分别设计了1~1.5 GHz的偶极子形式、电磁偶极子形式及Vivaldi形式的六边形PAF。

本文采用工作在8~16 GHz的Vivaldi天线作为阵元,组成矩形排列双极化形式的PAF,既可以实现双线极化辐射,也可以实现双圆极化辐射。通过控制PAF的激励,改变PAF辐射的方向图形状和相位分布等,实现了不同频段、不同扫描角度时所需

要的馈源分布。所设计的双极化PAF具有二维扫描特性,在仿真软件中对其进行了一维扫描验证,仿真结果表明,所设计的PAF在8~16 GHz内能够扫描到 $\pm 3^\circ$ ,且具有右旋圆极化特性。

## 1 反射面天线可展开结构

综合比较各种形式的可折叠方式,网状天线具有很大的折展比,且型面精度较高,在中大口径的天线中具有明显的优势,而径向肋式网面天线是其中运用最广的一类。

目前径向肋式可展开网状天线的结构基本分为两大类型,一类是以电机等驱动部件提供动力的有源式结构,另一类则是以弹簧弹性势能等作为驱动的无源式结构。前者的优点是可靠性高,可重复收展,展开速度平稳可控,缺点则是重量更大。而无源式结构的优点则是质量轻,但可靠性相对要差,展开速度也难以控制。

本设计中采用有源式结构方案,以步进电机作为整体动力,再通过谐波减速器和丝杠进行传动,丝杠螺母通过中心滑动盘与十二组连杆机构连接,连杆机构的末端均与天线肋固接,天线肋随末端连杆的运动而运动。连杆支座处转轴使用成对轴承来保证传动的精度和准确性,连杆末端下部延伸处采用电磁销进行锁定,以保证展开后天线面的整体刚度。整套机构结构可靠,具有较高的精度,天线展开速度平稳且展开过程易于控制。可实现重复收展,具有较大的折展比。其工作过程为:天线收拢时,锁定装置解锁,丝杠在电机和谐波减速器的驱动下运动,连杆机构带动天线肋随丝杠螺母上下直线移动而转动,完成天线的收拢过程;展开过程与之相反,待展开到位后,锁定装置动作,完成锁定。所设计的反射面天线展开过程如图1所示。

径向肋式可展开网状天线是应用比较广泛的一种大型空间天线。它的反射器主要由天线肋、反射网组成。在运输及运载状态下,天线面保持伞状收藏状态,入轨后展开成工作状态,没有附加任何精度调整系统。当金属网铺设在天线肋上时,在张力作用下与刚性天线肋之间形成一负高斯曲率面,并不是理想的抛物面,故在装配中需对整个反射面的精度进行调整,调整由反射面精度调整机构完成。因此,为了保证整套天线机构的精度与工作要求,对天线金属网面的加工精度

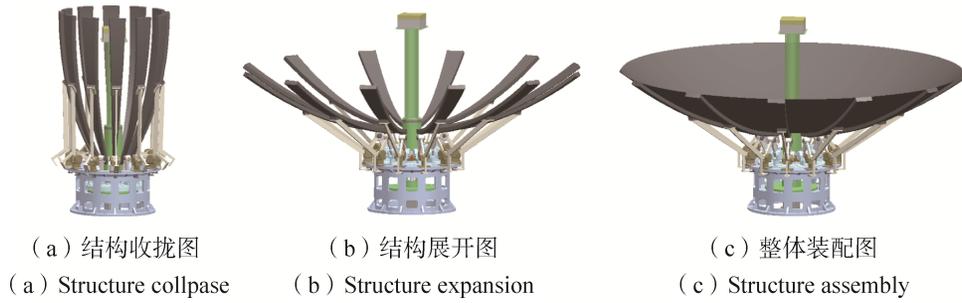


图 1 可展开反射面天线示意图

Fig. 1 Deployable structure of reflector antenna

与调整精度有很高的要求。

## 2 宽带相控阵馈源反射面天线

### 2.1 宽带相控阵馈源

本文中设计的反射面天线工作频段为 8~16 GHz, 焦径比为 0.35, 馈源半张角为 71°。采用较小的焦径比进行设计, 能够有利于可展开反射面天线的收拢结构更加紧凑。采用 PAF 作为反射面天线的馈源, 能够拓宽反射面天线的视场范围, PAF 的辐射口面中心与反射面天线的焦点重合。反射面天线的直径按照 1.14 m 设计以实现多波束功能, 在 12 GHz 处正馈工作的单波束对应反射面直径为 1 m, 波束宽度约为 1.75°, 通过采用 PAF 预计达到 6°×6° 的视场范围。

根据反射面天线理论, 改变焦平面阵列的相位中心就能改变反射面的口面场相位分布, 进而实现反射面天线的波束扫描。采用宽带相控阵天线作为馈源, 能够在宽频带范围内控制馈源的激励幅度和相位, 合理地改变馈源的相位中心和方向图形状, 从而满足宽频带内反射面指向不同角度时的馈源要求, 能够拓展反射面天线的视场范围。

常用波束偏离因子 (Beam Deviation Factor, BDF) 表示波束偏转角与相位中心横向偏焦距离的关系, BDF 可以通过公式 (1) 计算<sup>[17]</sup>。

$$S_{\text{bdf}} = \frac{\theta_b}{\theta_f} = \frac{\sin^{-1} \left[ \frac{d}{f} \cdot \frac{1+k(D/4f)^2}{1+(D/4f)^2} \right]}{\tan^{-1}(d/f)} \quad (1)$$

公式 (1) 中  $\theta_b$  是波束偏转角,  $\theta_f$  是馈源偏置角,  $D$  为反射面直径,  $d$  为馈源横向偏离焦点的距离,  $f$  是天线的焦距,  $k$  是与  $f$  和  $d$  有关的量, 一般取 0.3~0.7 之间, 本设计中取  $k$  为 0.4。

因此, 给定最大扫描角  $\theta_{b,\text{max}}$ , 就能估算出 PAF

的相位中心与反射面焦点的横向最大距离  $d_{\text{max}}$ ,  $d_{\text{max}}$  可以通过公式 (2) 计算。

$$d_{\text{max}} = f \cdot \tan \left( \frac{\theta_{b,\text{max}}}{S_{\text{bdf}}} \right) \quad (2)$$

由于  $d \ll f$ , 因此公式 (1) ~ (2) 又可以写成简化形式, 如公式 (3) ~ (4) 所示。

$$S_{\text{bdf}} \approx \frac{1+k(D/4f)^2}{1+(D/4f)^2} \quad (3)$$

$$d_{\text{max}} = f \cdot \frac{\theta_{b,\text{max}}}{S_{\text{bdf}}} \quad (4)$$

当均匀平面波沿抛物面轴向入射时, 焦面场的主极化分量  $\mathbf{E}_{\text{co}}$  可表示为公式 (5) 的形式。

$$\mathbf{E}_{\text{co}} = 2E_0 \frac{\pi D^2}{4f\lambda} \frac{J_1(u)}{u} \quad (5)$$

公式 (5) 中,  $E_0$  是入射场的幅度,  $u = kr \sin \theta_0$ ,  $r$  是参考点到焦点的距离,  $\theta_0$  是反射面的张角,  $J_1(x)$  是第一类贝塞尔函数。

通过计算轴向入射波的焦面场能量分布可以得出, 能量主要集中在第一零陷以内的区域, 而第三零陷内部包含的能量占总能量的 95%。

对于直径、焦径比、工作频段、扫描范围等参数确定的反射面天线, 根据以上公式就可以计算 PAF 的相关设计参数。

天线处于无线接收系统的最前端, 对整个系统的噪声温度非常重要, 采用全金属加工的形式, 能够有效降低天线的噪声温度, 进一步提升接收系统的性能。Vivaldi 天线能够实现良好的超宽带特性, 文献[18]实现了 10~35 GHz 的全金属 Vivaldi 相控阵天线。本文中选用 Vivaldi 天线作为馈源, 能够满足 8~16 GHz 宽带的需要。Vivaldi 天线的馈电方式为同轴端口馈电, Vivaldi 天线单元外形尺寸如图 2 所示, 单个天线厚度为 1.4 mm。

其中的指数曲线参数方程如公式 (6) 所示。

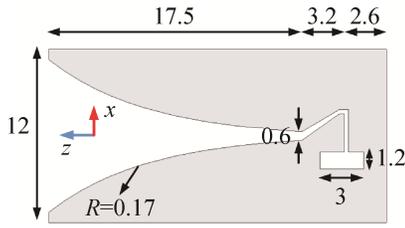


图2 Vivaldi天线单元尺寸外形(单位:mm)

Fig. 2 Dimensions of Vivaldi element (Unit: mm)

$$x = c_1 e^{Rz} + c_2 \quad (6)$$

公式(6)中的 $R$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ 均为常数,本设计中 $R$ 取0.17, $c_1$ 、 $c_2$ 由指数曲线起、末点的坐标 $(x_1, z_1)$ 和 $(x_2, z_2)$ 决定,通过公式(7)~(8)计算可得。

$$c_1 = \frac{x_2 - x_1}{e^{Rz_2} - e^{Rz_1}} \quad (7)$$

$$c_2 = \frac{x_1 e^{Rz_2} - x_2 e^{Rz_1}}{e^{Rz_2} - e^{Rz_1}} \quad (8)$$

文献[9]分析了PAF采样第一零深以内区域的情况下,六边形排布和正方形排布时最优单元间距与焦径比的关系,其结果表明最优单元间距与排布方式有关,当 $f/D=0.3\sim 0.7$ 时,PAF应采用正方形排布。此时的正方形排布与六边形排布口径效率相同,但正方形排布的最优单元间距更大,单元数量更少,因此馈源的性价比更高。本文设计的反射面天线焦径比为0.35,因此PAF应该选用正方形排布方式。此外,为了考虑工程应用中PAF对反射面天线的遮挡效应,在满足波束扫描的前提下,应该尽可能减小其尺寸。

对上述设计的Vivaldi天线进行矩形排列,组成 $6\times 7$ 的矩形阵列,单元间距为12 mm,略小于 $0.5\lambda_0$  ( $\lambda_0$ 为12 GHz对应的自由空间波长)。为了实现双极化辐射特性,将两个这样的 $6\times 7$ 元矩形阵列正交组合放置,如图3所示。这样形成的双极化Vivaldi阵列天线,既可以实现双线极化辐射特性,也可以实现双圆极化辐射特性。

## 2.2 反射面天线波束扫描

对于共焦面阵列馈电的反射面天线,CFM是其天线方向图综合常用的一种方法。CFM利用单元所在位置焦面场的共轭确定单元的激励,使馈源口面场与天线焦面场匹配,从而获得最高的天线效率,综合得出方向图,改善天线的可视范围。文献[6]基于物理光学法计算共焦面阵列中每个馈源照射反射面的次级远场方向图,利用遗传算法优化得到的权值对各次级方向图加权合成期望的

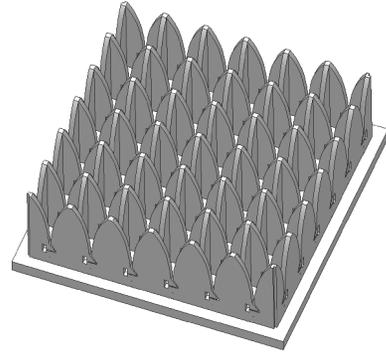


图3 双极化Vivaldi阵列天线

Fig. 3 Dual-polarized Vivaldi array

波束。文献[7]利用口面电场分布函数求解出焦平面上的电场,运用洛伦兹互易定理确定阵元的激励,将焦面电场的初级辐射方向图和阵列馈源的初级辐射方向图吻合度最高作为优化目标,并修正初始激励,最后利用辅助波束法对反射面远场辐射方向图部分区域进行修正,可以快速、稳健地设计致密焦面阵列馈源。采用上述设计的双极化Vivaldi阵列天线作为反射面天线的馈源,由于Vivaldi天线结构较为复杂,且阵元之间的相互耦合作用较大,因此使用CFM法计算得到的PAF激励会和实际激励之间存在相当大的误差。为了考虑PAF之间的耦合效应,本文也参考了文献[6]和[7]的研究方法,运用数值优化算法,综合得到了不同频点时扫描到不同角度的PAF激励。所设计的PAF能够实现二维波束扫描和双圆极化性能,下面对实现右旋圆极化波束进行一维扫描这一情况进行分析。所设计的PAF馈源反射面天线视场范围在12 GHz处约为 $6^\circ\times 6^\circ$ ,相应的波束扫描范围为 $-3^\circ\sim +3^\circ$ ,为了进一步探索PAF的扫描特性,同时也得到了俯仰角为 $+5^\circ$ 时的PAF激励。在12 GHz处,反射面天线扫描到 $0^\circ$ 、 $3^\circ$ 和 $5^\circ$ 时PAF的激励幅度分布如图4所示。

从图4可以看出,PAF的激励幅度分布近似为环形分布,随着环半径的增大,幅度基本呈减小趋势,即能量比例逐渐变小;PAF的阵元激励幅度均不为零,即所设计的PAF每个阵元均参与到馈源的波束形成中。当反射面天线进行波束扫描时,PAF的激励幅度分布随之改变,幅度分布中心环也沿波束扫描的直线方向进行相应偏移。反射面天线指向 $0^\circ$ 时,能量占比最大的四个天线单元分布在PAF的中间位置;当反射面天线扫描到 $3^\circ$ 时,

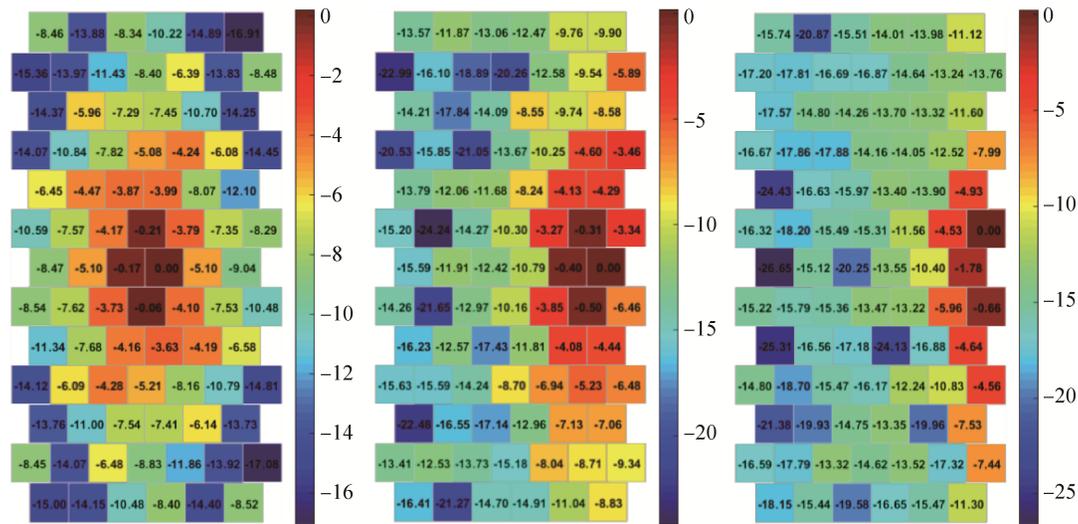


图 4 反射面天线扫描到 0°、3°和 5°时 PAF 幅度分布图(单位: dB)

Fig. 4 Amplitude distribution of PAF when reflector antenna scans to 0°, 3° and 5° (Unit: dB)

能量占比最大的四个天线单元沿着扫描直线进行偏移, 整个环形幅度分布区域也随之偏移, 可以看出此时 PAF 的采样仍能包含焦面场的主要能量分布; 当反射面天线扫描到 5°时, 环形幅度分布区域仍然沿扫描直线偏移, 而 PAF 口径较小, 采样已不能包含焦面场的主要能量分布, 能量占比最大的天线单元个数减少, 幅度分布中心环的面积也相应减小。

为验证以上结果, 采用仿真软件 FEKO 对有无 PAF 遮挡两种情况的反射面天线进行仿真, 得到反射面天线在不同频点处扫描到不同角度的增益值见表 1。有 PAF 遮挡时, 反射面天线在 8 GHz、12 GHz 和 16 GHz 处的扫描增益曲线如图 5 所示。

表 1 反射面天线扫描增益对比(单位: dB)

Table 1 Comparison of reflector antenna scanning gain(Unit: dB)

频率	8 GHz	12 GHz	16 GHz	
理论增益	39.60	43.12	45.62	
Grasp 仿真增益	38.19	41.72	44.22	
无 PAF 遮挡扫描	0°增益	38.32	41.84	42.03
	0°效率	74.47%	74.47%	43.75%
	3°增益	37.57	41.04	41.34
	5°增益	36.9	38.97	38.84
有 PAF 遮挡扫描	0°增益	38.03	40.65	41.48
	0°效率	69.66%	56.62%	38.54%
	3°增益	37.68	40.68	41.09
	5°增益	36.77	38.83	38.74

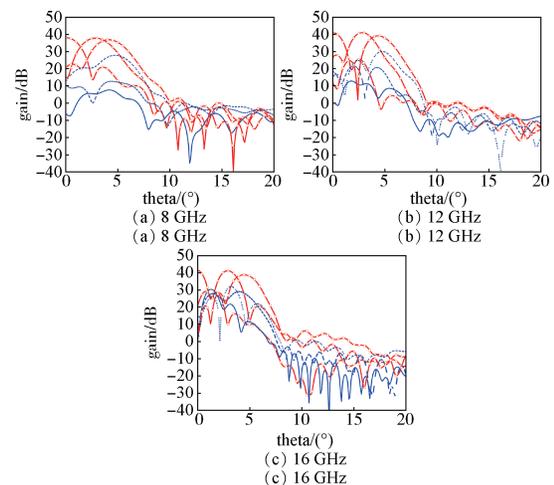


图 5 反射面天线扫描到 0°、3°、5°的增益曲线

Fig. 5 Antenna gain scanning to 0°, 3° and 5° respectively

从表 1 可以看出, 无 PAF 遮挡时反射面天线指向 0°的效率在 8 GHz、12 GHz 和 16 GHz 处分别为 74.47%、74.47% 和 43.75%, 有 PAF 遮挡时相应的效率分别为 69.66%、56.62% 和 38.54%, 天线在低频和中心频点处的效率较高, 而在高频处的效率较低。工作在高频时天线效率较低的因素主要有两个, 一是本文中设计的反射面天线焦径比小, 反射面直径为 1.14 m, 但焦距仅为 0.35 m, 导致整个频段内天线的口径效率都不是非常高, 合理地增大反射面天线的焦径比能够提高工作频段内的口径效率。例如, 对直径为 1.14 m 的正馈单反射面天线在 Grasp 中进行仿真, 焦距为 0.35 m 时, 在

16 GHz的增益约为44.21 dB,相应的口径效率为71.39%,而焦距为1.14 m时,在16 GHz的增益约为44.66 dB,口径效率为80.20%。二是PAF阵元在高频的波束宽度要比低频和中频的窄很多,单个阵元的高频方向图在一些切面内已经基本实现所需的照射锥分布,而组阵后的波束宽度比单个阵元的要窄,导致PAF不能更好地实现所需的照射锥分布。例如,对于直径为1.14 m,焦距为0.35 m的正馈单反射面天线,馈源照射角应为78.3°,馈源照射电平为12 dB,而PAF的单个Vivaldi阵元在16 GHz时波束宽度明显变窄,Vivaldi阵元组阵后形成的PAF波束宽度更窄,此时的PAF难以良好地实现所需的照射锥分布,PAF作为馈源时反射面天线增益仅为42.03 dB,作为对比,采用安装在地板上的单个圆极化波导天线作为馈源,反射面天线则能够实现43.17 dB的增益。

此外,有PAF遮挡时反射面天线的效率明显小于无PAF遮挡的。无PAF遮挡时,反射面天线在8 GHz、12 GHz和16 GHz处指向0°的增益分别为38.32 dB、41.84 dB和42.03 dB,口径效率分别为74.47%、74.47%和43.75%;有PAF遮挡时相应的反射面天线增益分别下降了0.29 dB、1.19 dB和0.55 dB,口径效率分别为69.66%、56.62%和38.54%,相应减小了4.81%、17.85%和5.21%。无PAF遮挡时,在8 GHz、12 GHz和16 GHz处扫描到3°增益分别下降约0.75 dB、0.80 dB和0.69 dB,相应的口径效率为62.66%、61.94%和37.32%。有PAF遮挡时,反射面天线在8 GHz和16 GHz处扫描到3°增益下降约为0.39 dB,在12 GHz增益变化不明显;此外,反射面天线在8 GHz、12 GHz和16 GHz处扫描到5°增益下降分别为1.26 dB、1.82 dB和2.74 dB。

从图5的扫描曲线中可以看出,在8 GHz、12 GHz和16 GHz处,反射面天线的波束基本上可以扫描到3°和5°,虽然扫描有小幅度误差,但仍能表明上述的激励是有效的。此外,所实现扫描波束的圆极化特性随频率和扫描角度增加而变差,波束宽度随扫描角度增加而变宽,副瓣也有所提升。从图5中也可以看出,当波束从0°扫描到3°左右时,反射面天线的增益变化不大,说明所设计的PAF能够较好地还原反射面天线的焦面场。

### 3 结束语

为了便于反射面天线空间应用,选用焦距比较小的反射面天线进行研究,对反射面天线的结构进行了可展开设计,有效地减少了其收拢状态的包络尺寸。采用Vivaldi天线形式组成的相控阵作为馈源,可以在8~16 GHz内实现波束的二维扫描,能够有效地拓展反射面天线的视场,本文给出了右旋圆极化波束进行一维波束扫描的仿真结果。所设计的PAF在低频和中频具有良好的口径效率,在高频处效率偏低,文中对其原因进行了分析比较,对于可展开反射面天线、空间中继星天线具有一定的参考价值。

### 参考文献

- [1] 张立华,熊亮,孙骥,等.嫦娥四号任务中继星"鹊桥"技术特点[J].中国科学:技术科学,2019,49(2):138-146.  
ZHANG Lihua, XIONG Liang, SUN Ji, et al. Technical characteristics of the relay communication satellite "Queqiao" for Chang'e-4 lunar farside exploration mission [J]. Scientia Sinica Technologica, 2019, 49(2): 138 - 146.
- [2] CHAHAT N, SAUDER J, THOMSON M, et al. Ka-band deployable mesh reflector antenna compatible with the deep space network[C]//11th European Conference on Antennas and Propagation, 2017.
- [3] 刘昊,杨留义,沈永正,等.星载柔性复合材料壳面可展开天线研究进展[J].遥测遥控,2021,42(4):45-52.  
LIU Hao, YANG Liuyi, SHEN Yongzheng, et al. Advances of spaceborne deployable reflector based on flexible composites shells[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(4): 45 - 52.
- [4] 马小飞,李洋,肖勇,等.大型空间可展开天线反射器研究现状与展望[J].空间电子技术,2018(2):16-26.  
MA Xiaofei, LI Yang, XIAO Yong, et al. Development and tendency of large space deployable antenna reflector [J]. Space Electronic Technology, 2018(2): 16 - 26.
- [5] 赵春雨.超宽角扫描多波束透镜天线关键技术研究[D].成都:电子科技大学,2020.
- [6] 曹海林,杨力生,王韬,等.基于遗传算法的深空探测天线综合[J].计算机应用,2010,30(7):1739-1741.  
CAO Hailin, YANG Lisheng, WANG Tao, et al. Pattern synthesis of antenna in deep-space exploration with genetic algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(7): 1739 - 1741.
- [7] 何山红,纪萌茜,解良玉,等.一种快速稳健的致密焦面

- 阵列馈源设计方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(11): 2623 - 2631.
- HE Shanong, JI Mengqian, XIE Liangyu, et al. A fast and robust design method for dense focal plane array feed [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(11): 2623 - 2631.
- [8] 曹佳东. 星载大口径反射面天线多波束设计方法研究[D]. 北京: 中国空间技术研究院, 2021.
- [9] 田佳怿, 杜彪, 伍洋, 等. 反射面天线焦面场采样研究与相控阵馈源设计[J]. 电波科学学报, 2021, 42(4): 45 - 52.
- TIAN Jiayi, DU Biao, WU Yang, et al. Study on the focal field sampling and design of phased array feed [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 42(4): 45 - 52.
- [10] CHEN K Y, WARNICK K F. Optimising the design of phased array feeds for survey speed[J]. Electronics Letters, 2020, 56(1): 7-9.
- [11] ROSHI D A, SHILLUE W, SIMON B, et al. Performance of a highly sensitive, 19-element, dual-polarization, cryogenic L-band phased-array feed on the Green Bank Telescope[J]. The Astronomical Journal, 2018, 155 (5): 1-18.
- [12] FAN J, YANG J, YAN Y H, et al. Design of octave-bandwidth phased array feed for large radio telescope [C]//European Conference on Antennas and Propagation, Krakow, 2019.
- [13] 韩玉兵, TRAN V, 汤蕾蕾, 等. 五百米口径球面射电望远镜的相控阵馈源设计[J]. 电波科学学报, 2016, 31 (2): 219 - 227.
- HAN Y B, TRAN V, TANG L L, et al. Design of phased array feed for five-hundred-meter aperture spherical telescope[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2016, 31 (2): 219 - 227.
- [14] 伍洋, 杜彪, 刘肖萌, 等. 焦面场分析与相控阵馈源设计[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(5): 1236 - 1240.
- WU Yang, DU Biao, LIU Xiaomeng, et al. Focal field analysis and phased array feed design[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(5): 1236 - 1240.
- [15] 何晨阳. 相控阵列馈源关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学, 2013.
- [16] 仲洛清. 500米口径球面射电望远镜的相控阵馈源设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [17] LO Y. On the beam deviation factor of a parabolic reflector[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1960, 8(3): 347-349.
- [18] MOHAMED A E, GAERON R F, LJUBODRAG B B, et al. An X-through Ka-band thinned all-metal Vivaldi phased array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(11): 7613-7623.
- [作者简介]
- 薛裕晓 1994年生, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为宽带天线、相控阵天线。
- 沈永健 1985年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为超宽带接收、发射系统。
- 张峪维 1992年生, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为天线伺服设计技术。
- 李敏 1995年生, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为天线结构设计技术。
- 刘昊 1976年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为大型天线与微波技术。

(本文编辑: 潘三英)