

伍洋, 杜彪, 金乘进, 等. 平方公里阵天线新技术综述[J]. 电波科学学报, 2016, 31(2): 413-419. DOI: 10.13443/j.cjors.2015061005
WU Y, DU B, JIN C J, et al. Overview of new antenna technologies for the Square Kilometre Array[J]. Chinese journal of radio science, 2016, 31(2): 413-419. (in Chinese). DOI: 10.13443/j.cjors.2015061005

平方公里阵天线新技术综述

伍洋^{1,2,3} 杜彪^{1,2} 金乘进^{1,3} 彭勃^{1,3}

(1. 射电天文技术联合实验室, 北京 100012; 2. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081;
3. 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘要 天线是射电望远镜系统关键组成部分, 其性能对于望远镜的观测能力有着决定性的影响. 数十年来, 射电望远镜天线技术不断发展, 在有效接收面积、观测带宽和视场等各个方面取得了巨大进步, 并推动了新的科学发现. 文章对射电天文领域出现的多项先进的天线技术, 包括整体成型面板、相控阵馈源、超宽带单波束馈源和孔径阵列等进行了详细的介绍. 作为国际上正在积极推进的平方公里阵(Square Kilometre Array, SKA)的关键技术, 这些技术已经取得了重要突破, 其他领域的天线也可有所借鉴.

关键词 射电望远镜; 天线; 多波束; 超宽带; 孔径阵列

中图分类号 TN823

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2016)02-0413-07

DOI 10.13443/j.cjors.2015061005

Overview of new antenna technologies for the Square Kilometre Array

WU Yang^{1,2,3} DU Biao^{1,2} JIN Chengjin^{1,3} PENG Bo^{1,3}

(1. Joint Laboratory for Radio Astronomy Technology, NAOC & CETC 54, Beijing 100012, China;
2. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China;
3. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract Performance of a radio telescope mainly depends on the front-end, especially the antennas. During the past decades, characteristics of the antennas are greatly improved, such as effective receiving area, frequency bandwidth, and field-of-view etc, which enables new scientific discoveries. This paper presents an overview of the emerging technologies of antennas for the next-generation radio telescopes, including the single-piece reflector panel, phased array feed, ultra-wideband single pixel feed, and aperture array. As part of the worldwide efforts toward the Square Kilometre Array(SKA), these technologies are actively prompted and breakthroughs have been made, which may also provide experiences for other antennas.

Keywords radio telescope; antenna; multi-beam; ultra-wideband; aperture array

引言

射电天文学是天文学的一个分支, 通过接收和处理来自天体的无线电信号, 研究宇宙现象, 探索

自然奥秘. 20 世纪 30 年代, Jansky 发现了来自银河系的无线电波, 标志着人类打开了传统光学以外观测天体的新窗口. 80 余年来, 射电天文学蓬勃发展, 产生了类星体、脉冲星、星际分子和宇宙微波

收稿日期: 2015-06-10

资助项目: 国家重点基础研究发展计划(2013CB837900); 国家高技术研究发展计划(SS2014AA12 2001);

国家自然科学基金(11261140641)

联系人: 伍洋 E-mail: ywu@nao.cas.cn

背景辐射等一系列重大的天文发现,在微波频段进行天文观测已由当初的偶然发现,发展成为天文研究的重要途径。

天线是射电望远镜的关键组成部分,其性能对于望远镜的观测能力有着决定性的影响。对射电望远镜而言,灵敏度 S ,即望远镜的有效接收面积 A_e 与系统温度 T_{sys} 的比值是最主要的技术指标。

射电天文观测中,一般通过天线温度的升高来检测射电源的存在。望远镜系统的最小可检测流量 ΔS 可表示为^[1]

$$\Delta S = \frac{kT_{\text{sys}}}{A_e \sqrt{tB}} \quad (1)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数; B 和 t 分别为观测的带宽和积分时间。由式(1)可以看出,射电望远镜的有效接收面积 A_e 越大、系统温度 T_{sys} 越低、观测带宽 B 越宽、积分时间 t 越长,其最小可检测流量 ΔS 越小,射电望远镜越灵敏。此外,通过增加望远镜波束的数量,能够有效扩大射电望远镜的视场,提高观测效率。

近年来,得益于科技的进步,射电望远镜天线技术不断发展,在有效接收面积、观测带宽和波束数量等与射电望远镜观测能力相关的各个方向均取得了很大进步,促进了望远镜的升级换代,并推动了新的科学发现。平方公里阵(Square Kilometre Array, SKA)^[2]作为下一代米波至厘米波段射电望远镜,将建设低频孔径阵列、中频孔径阵列和中频反射面天线阵列三种接收天线阵列,接收面积达到一平方千米量级,频率覆盖 70 MHz~20 GHz。根据规划,每台 SKA 反射面天线将配备 5 个单波束馈源以获得高的单波束灵敏度,或 3 个相控阵馈源以获得大视场观测能力,而低频和中频孔径阵列均具备多波束观测能力,从而使 SKA 在灵敏度和巡天效率方面和现有射电望远镜相比有大幅提高。

本文介绍了在 SKA 项目推动下,天线技术在整体成型反射面、相控阵馈源、超宽带单波束馈源和孔径阵列等方面的新进展。

1 整体成型面板

提高射电望远镜灵敏度的方式有两个途径:降低系统温度和增大有效接收面积。现今,射电望远镜在分米、厘米波段已普遍采用制冷方式降低系统温度,并已接近物理极限。因此增大有效接收面积成为了现阶段提高灵敏度的主要方式。

目前,全可动射电望远镜天线的口径已达到了

100 m,接近地面工程极限。大口径的全可动射电望远镜造价高昂,且可实现口径有限,因此天线组阵是增大望远镜接收面积的必然选择。20 世纪 70 年代 Ryle 发明了综合孔径技术后,伴随着电子与信息技术的快速发展,电子器件的成本大幅下降,考虑到反射面天线的造价与天线口径的高次方成正比,由中小口径反射面天线组成的综合孔径射电望远镜日渐流行。

中小口径的反射面天线阵列不仅单位面积造价低,可靠性高,还能使射电望远镜突破天线口径的限制,实现更高的灵敏度和分辨率。中小口径的反射面天线单元的结构设计相对简单,但考虑到 SKA 反射面天线阵列单元数量多,且要在有限时间内完成生产、运输、安装和调试,因此必须满足低成本、批量生产、便于运输和快速安装的要求。为此,反射面整体成型技术应运而生。

通过反射面整体成型技术,整个反射面可仅由一块面板构成,其最大的好处在于反射面不需要拼装和调整面形精度,节约了天线安装和调整的时间。同时消除了面板缝隙的影响,提高了天线的灵敏度。其难点在于,为满足天线在高频段的口径效率,要求面板的制造精度高,且面形精度随俯仰角的变化不大,这就对反射体的结构设计和加工工艺提出了极高的要求。目前,采用整体成型面板的反射体方案主要有边缘支撑和桁架支撑两种方案。

边缘支撑反射体方案在反射面边缘用钢材料背架进行多点支撑,同时在反射面中心采用半适应结构支撑。该技术已在 ATA (Allen Telescope Array) 项目中得到了应用^[3]。ATA 反射面天线单元的主面直径为 6 m,采用了液压整体成形的铝面板,面型精度达到 1 mm。但对于更大口径的反射面制造,如 SKA 项目要求的 18 m×15 m 的主反射面,碳纤维复合材料更为适合。加拿大 NRC(National Research Council)为 SKA 研制的天线样机 DVA-1^[4](Dish Verification Antenna-1)采用了类似方案(图 1)。



图 1 采用边缘支撑整体成型面板的 DVA-1 反射体

如图 1 所示,该反射体结构形式简洁,背架部分易于加工,但反射面边缘与中心之间的部分缺少支撑,面形精度易受重力的影响。

桁架支撑反射体方案,结合了整体成型反射面的先进理念与桁架支撑的成熟技术。图 2 给出了中国为 SKA 项目研制的首部天线样机 DVA-C (Dish Verification Antenna-China)^[5] 采用的桁架支撑反射体的示意图。DVA-C 的反射面采用 2 mm 厚的碳纤维复合材料整体成型,反射面背面布有泡沫三明治结构的加强筋。反射面与加强筋通过胶结连接,能够有效提高反射面的精度。主副反射面之间采用钢结构背架连接。该方案结构相对复杂,但更容易保证面形精度。

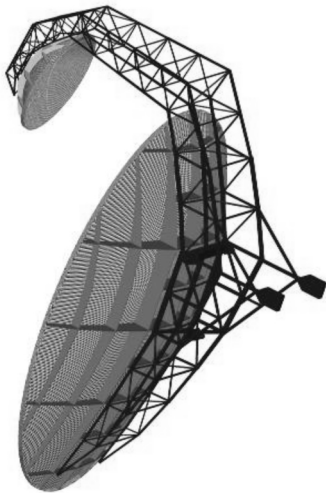


图 2 采用桁架支撑整体成型面板的 DVA-C 反射体

整体成型面板技术的提出是反射面天线设计理念的进步,高精度、大尺度反射面的制造对结构设计和加工工艺提出了挑战,目前针对 SKA 的碳纤维复合材料整体成型面板精度可达到 1 mm r. m. s. 以内,能够满足天线工作于 10 GHz,但距 SKA 面形精度优于 0.5 mm r. m. s.、工作于 20 GHz 的要求尚有一定差距。其最终所能达到的面形精度将制约射电望远镜未来向更高频段的发展。此外,碳纤维复合材料能否在数十年的时间里保持面形精度不变,尚有待验证。

2 相控阵馈源

射电望远镜需要对全空域进行观测,对于波束极窄的射电望远镜,完成一次巡天需要很长时间。增加波束数量是扩大射电望远镜视场、提高巡天速度的最直接的途径。以往射电望远镜主要通过增加

馈源数量的方式实现多波束^[6-7]。这一方案的主要缺点在于:各馈源的相位中心受馈源尺寸的限制相距较远,导致波束间隔较大,无法实现连续的天区覆盖。同时,偏离焦点的焦面场与馈源口面场失配,引起偏轴波束性能下降,限制了天线的波束数量。而新兴的相控阵馈源^[8]可以较好地解决这些问题。

针对射电天文应用的相控阵馈源(Phased Array Feed)技术研究始于 20 世纪末,该技术以放置在反射面天线焦平面附近的小型相控阵天线作为多波束馈源,其与多喇叭馈源的主要区别在于:

- 1) 以多个阵元代替单个喇叭照射反射面,阵元数量与天线波束数量无必然联系;
- 2) 阵元复用,每个阵元的输出信号被用于多个波束的合成。

图 3 给出了相控阵馈源的工作原理框图:射电信号经反射面反射,汇聚于焦点附近,由位于焦平面的馈源阵列接收,再经低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)放大、后续放大(可变频)及采样后送入数字波束合成网络,赋权合成后输出。

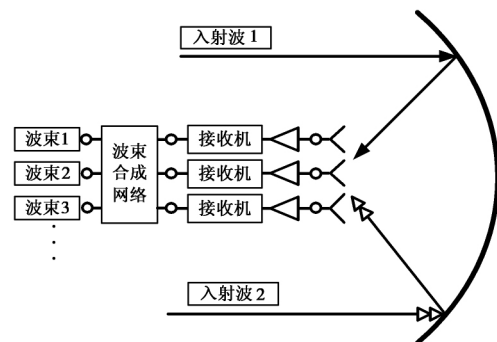


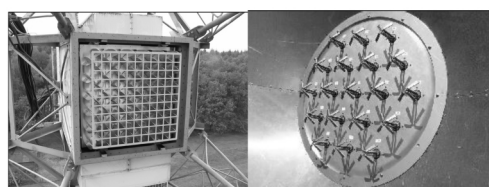
图 3 相控阵馈源工作原理框图

与传统的多波束馈源相比,相控阵馈源主要具有以下优点:

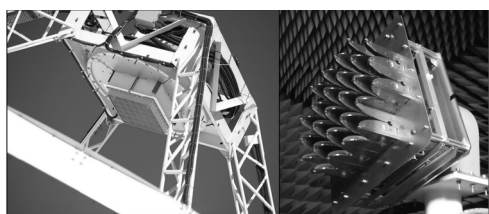
- 1) 快速巡天。相控阵馈源能够同时提供数量更多、相互交叠、且性能更为相近的波束,有效提高射电望远镜的巡天速度。
- 2) 改善照明。通过适当的赋权合成,提高天线的口径效率,同时抑制远旁瓣,降低漏失引起的噪声温度,提高射电望远镜的灵敏度。

此外,相控阵馈源还有消除电磁干扰、补偿反射面变形及减小望远镜结构扰动影响^[9-11]的功能,因此成为包括 SKA 在内的新一代射电望远镜的代表技术之一。目前,国际上主要有荷兰 ASTRON (Netherlands Foundation for Research in Astronomy)、美国 NRAO/BYU (National Radio Astrono-

my Observatory/Brigham Young University、澳大利亚 CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) 和加拿大的 NRC 等机构在进行相控阵馈源技术研究^[12-15]。此外,我国也正以 500 m 口径球面射电望远镜 (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST) 为对象,开展相关研究工作^[11]。图 4 和表 1 分别给出了国外四种相控阵馈源的照片和技术指标。



(a) 荷兰 APERTIF (b) 美国 GBT PAF



(c) 澳大利亚 ASKAP (d) 加拿大 AFAD

图 4 相控阵馈源样机

表 1 相控阵馈源主要特性对比

技术指标	ASKAP	APERTIF	AFAD	GBT PAF
工作频率 /GHz	0.7~1.8	1.0~1.75	0.7~1.5	1.3~1.8
阵元形式	Connected Dipole	Vivaldi	Vivaldi	Thick Dipole
阵列规模	9×10×2	8×7×2	41	19×2
波束数量	36	37	—	7
瞬时带宽 /MHz	300	300	500	窄带
系统噪声 /K	50	70	50	35

由表 1 可看出,相控阵馈源主要工作在分米波段,研究方向主要有两个:宽频带和低噪声。除 NRAO/BYU 为 GBT (Green Bank Telescope) 研制的相控阵馈源外,其它三部样机的应用均瞄准中小口径天线阵列,工作带宽接近或超过一个倍频程,瞬时带宽达到几百兆赫兹,波束数量几十个,由于采用常温 LNA,其系统温度较高,影响了望远镜单波束的灵敏度以及巡天速度的提升。而 NRAO/BYU 则针对大口径射电望远镜天线开展研发工作,因此更

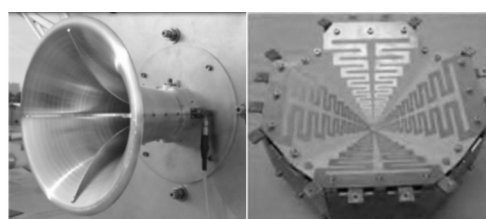
注重单波束效率,采用了制冷的 LNA,以及与之相匹配的天线单元,但传统的喇叭馈源相比,目前样机达到的系统温度偏高。

由于馈源阵列互耦噪声的影响,以及有源阻抗引起的 LNA 噪声提高,目前相控阵馈源的系统温度较制冷的喇叭馈源存在一定差距,限制了望远镜单个波束的灵敏度,这是其发展中亟需解决的问题。

3 超宽带单波束馈源

天体辐射具有不同的频谱特性,除大视场外,在更宽的频带内对某一射电源进行观测也一直是射电望远镜的发展方向。由于传统馈源的工作带宽仅有一个倍频程左右,望远镜天线往往需要配备数套不同频段的馈源;并设计一套复杂的馈源切换系统。观测时,在频段间进行切换^[16-18]。若射电望远镜能够配备超宽带单波束馈源,则不仅能获得超宽频带观测能力,提高射电望远镜灵敏度,而且能有效减少接收机数量,降低工程建设和运行维护成本。

目前,见诸报道的超宽带单波束馈源主要有四脊喇叭 (Quad-Ridge Flared Horn)、Eleven 馈源、ATA 对数周期馈源、QSC (Quasi-Self-Complementary) 馈源、Sinuous 馈源^[19-24]等,其外形及主要特点分别如图 5 和表 2 所示。



(a) QRFH (b) Eleven 馈源



(c) ATA 对数周期馈源 (d) QSC 馈源



(e) Sinuous 馈源 (f) 平面 Sinuous 馈源

图 5 各种超宽带单波束馈源

表 2 超宽带单波束馈源主要特性对比

馈源名称	方向图特性	带宽比
Eleven	波束宽度与相位中心恒定	7 : 1
ATA	波束宽度恒定, 相心变化大	10 : 1
QSC	波束宽度恒定, 高频性能下降	10 : 1
Sinusoidal	波束宽度恒定, 高频性能下降	4 : 1
QRFH	波束宽度可调	7 : 1

除了阻抗带宽外, 为保证反射面天线在宽频带内的高效率, 作为馈源的天线其波束宽度及相位中心要求比较恒定。就辐射机理而言, 除四脊喇叭外, 其余超宽带单波束馈源均采用频率无关设计。ATA 馈源为两对倾斜放置的对数周期天线, Eleven 馈源和 QSC 馈源都借鉴了对数周期天线的设计, 并在馈电端引入金属反射板, 将天线相位中心稳定在馈电点附近。采用频率无关设计的优点在于, 馈源方向图波束宽度和相位中心随频率变化较小, 且高度较低, 缺点是天线一般需要四端口甚至八端口馈电, 比较复杂。此外, 由于馈源的结构形式在宽频带难以真正实现与频率无关, 天线在某些频段及高频段的性能不可避免地受到一些影响。

四脊喇叭利用脊波导截止波长较长的特性, 以逐渐张开的四脊波导实现能量的双极化宽频带定向辐射。其特点是馈电方便, 插入损耗较小, 但其属于口径天线, 因此方向图和相位中心随频率有一定变化。

尽管上述馈源实现了超宽频带的阻抗特性, 但其照射反射面时的性能与传统的倍频程馈源相比尚有一定差距, 尤其是在高频段, 照射效率仅有 50% ~ 60%, 这也为各国专家学者留下了更多的研究空间。

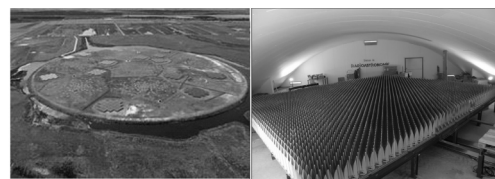
4 孔径阵列

在米波波段, 中小口径反射面天线的电尺寸相对较小, 微波光学难以成立, 而大口径反射面天线造价高昂, 因此更多采用低方向性天线组成阵列的方式实现大接收面积。早期的孔径阵列不具有电子调相能力, 需要通过机械转动改变唯一波束的指向。随着科技的发展, 相控阵天线也开始在射电天文领域得到应用。虽然相控阵天线技术已在雷达、通讯等领域得到广泛应用, 但用于射电天文的相控阵所需的波束数量、多倍频程带宽、低噪声、以及信号处理和校准技术, 是前所未有的。

出于对接收面积的需求, 用于射电天文的孔径阵列常常由数万甚至数十万个宽带天线单元组成,

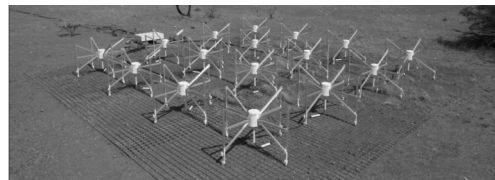
其数量和工作带宽远大于其它领域天线。此外, 射电天文孔径阵列一般先由大量单元组成一个站点, 相当于一面几十米的天线, 再由各个稀疏分布的站点组成一个更大规模综合孔径望远镜。由于单个阵元的波束很宽, 几乎可以看到整个空域, 在后端信号处理能力允许的情况下, 孔径阵列可形成大量的独立波束, 为快速巡天提供极大的便利, 这是大口径的反射面天线无法比拟的。

目前, 世界上新建和在建的孔径阵列形式的射电望远镜主要有, 欧洲 LOFAR (Low Frequency Array)、EMBRACE (Electronic Multi-Beam Radio Astronomy Concept)、澳大利亚 MWA (Murchison Widefield Array) 和美国 LWA (Long Wavelength Array)^[25-29] 等, 如图 6 所示。



(a) LOFAR

(b) EMBRACE



(c) MWA

图 6 孔径阵列形式的射电望远镜

以上阵列的站点从形式上可分为稀疏阵和致密阵两种。500 MHz 以下, 天空噪声温度与波长的 2.55 次方 ($\lambda^{2.55}$) 成正比, 而低方向性天线的有效接收面积约为波长平方的一半 ($\lambda^2/2$), 因此采用稀疏阵形式可近似得到灵敏度与频率无关的望远镜阵列。而在 500 MHz 以上, 天线插损和 LNA 已成为系统噪声的主要来源, 此时采用致密阵更有利于压低远旁瓣, 实现高的灵敏度^[26]。由于阵元数量巨大, 直接对每个阵元输出的宽带信号进行波束合成和相关目前难以实现。因此, 这些阵列均采用信号放大、分级模拟合成、再采样和数字合成, 站点间同指向波束相关的方式进行处理。尽管如此, 孔径阵列, 尤其是致密阵的信号处理、传输和校准, 以及阵列功耗, 对现有技术而言仍是巨大挑战。

目前, SKA 规划建设低频和中频两个孔径阵列 (见图 7)^[29], 前者将由上百万个对数周期天线组成,

频率覆盖 50~350 MHz,后者由分布在 200 km 内的 250 个 Vivaldi 阵列天线站点(station)组成. 每个站点的阵列天线直径约 60 m,频率覆盖 400~1 400 MHz. 这两个口径阵列望远镜的建成,将为米波到分米波段的观测提供前所未有的灵敏度和巡天速度,极大地推动射电天文学的发展.



图7 SKA 低频和中频孔径阵列效果图

5 结 论

在 SKA 项目的推动下,天线技术得到了蓬勃发展.工作于米波段的多波束数字孔径阵列将赋予望远镜巨大接收面积和超大视场.得益于整体成型技术的出现,数以千计的用于分米、厘米波的反射面天线得以快速安装.其配备的相控阵馈源与超宽带单波束馈源的使用,将分别赋予这些反射面天线几十个波束同时观测和超宽频带内同时观测的能力.先进的天线设计技术和制造工艺的研发和应用,将赋予射电望远镜前所未有的灵敏度和巡天速度,并使现有的望远镜焕发新的活力,从而为新的科学发现提供可能.而这些射电望远镜天线技术本身,也将极大推动整个天线行业的技术发展.

参考文献

- [1] 克里斯琴森. 射电望远镜[M]. 陈建生,译. 北京: 科学出版社, 1977: 187-194.
- [2] DEWDNEY P, HALL P, SCHILIZZI R, et al. The Square Kilometre Array [J]. Proceeding of IEEE, 2009, 97(8): 1482-1496.
- [3] WELCH J, BACKER D, BLITZ, et al. The Allen Telescope Array: the first widefield, panchromatic, snapshot radio camera for radio astronomy and SETI [J]. Proceeding of IEEE, 2009, 97(8): 1438-1447.
- [4] HOVEY, G, LACY G, BYRNES P, et al. Development of the dish verification antenna-1 for the square kilometre array[C]//16th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics. Victoria, Canada, July 13-16, 2014. DOI:10.1109/ANTEM.2014.6887671.
- [5] CHAI X M, DU B, ZHENG Y P, et al. Dish verification antenna China for SKA [C]//International Symposium on Antennas and Propagation. Nanjing, China, October 23-25, 2013.
- [6] KILDAL P S, JOHANSSON M, HAGFORS T, et al. Analysis of a cluster feed for the Arecibo trireflector system using forward ray tracing and aperture integration [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 1993, 41(8): 1019-1025.
- [7] POPENKO N, KHAIKIN V, LEBEDEV M, ETAL. Highly effective array feed for RATAN-600 radio telescope in a multibeam mode[C]//International Workshop on Terahertz and Mid Infrared Radiation: Basic Research and Practical Applications. Turunç-Marmaris, Turkey, November 3-6, 2009: 61-62.
- [8] 伍洋, 杜彪, 金乘进, 等. 射电望远镜相控阵馈源技术[J]. 电波科学学报, 2013, 28(2): 348-353.
WU Y, DU B, JIN C J, et al. Phased array feed technology for radio telescope[J]. Chinese journal of radio science, 2013, 28(2): 348-353. (in Chinese)
- [9] HANSEN C, WARNICK K, JEFFS B. Interference cancellation using an array feed design for radio telescopes[C]//Proceeding of IEEE Antennas Propagation Society International Symposium. June 20-25, IEEE, 2004, 1: 539-542.
- [10] RAHMAT-SAMII Y. Array feeds for reflector surface distortion compensation: concepts and implementation [J]. IEEE antennas and propagation magazine, 1990: 20-26.
- [11] WU Y, JIN C, WARNICK K. Design study of an L-Band phased array feed for wide-field surveys and vibration compensation on FAST[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2013, 61(6): 3026-3033.
- [12] VAN CAPPELLEN W A, BAKKER L, OOSTERLOO T A. APERTIF: Phased array feeds for the Westerbork Synthesis Radio Telescope[C]//General Assembly and Scientific Symposium. Istanbul, August 13-20, 2011.
- [13] WARNICK K F, CARTER D, WEBB T, et al. Towards a high sensitivity cryogenic phased array feed antenna for the Green Bank Telescope[C]//General Assembly and Scientific Symposium. Istanbul, August 13-20, 2011.
- [14] CHIPPENDALE A, SCHINCKEL A. ASKAP: Progress towards 36 parabolic reflectors with phased array feeds [C]//General Assembly and Scientific Symposium. Istanbul, August 13-20, 2011.
- [15] VEIDT B, HOVEY G J, BURGESS T, et al. Dem-

- onstration of a dual-polarized phased-array feed[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2011, 59(6): 2047-2057.
- [16] IMBRIALE W. Large antennas of the deep space network[M]. New York: McGraw Hill, 2003.
- [17] CORTES-MEDELLIN G. The 64 m Sardinia radio telescope optics design[C]//IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Society, 2002, 4: 136-139.
- [18] 伍洋, 杨可忠. 偏轴卡塞格伦天线的二次赋形[J]. 电波科学学报, 2010, 25(5): 899-904.
WU Y, YANG K Z. Design for re-shaped Cassegrain antenna with offset feeds[J]. Chinese journal of radio science, 2010, 25(5): 899-904. (in Chinese)
- [19] YANG J. Preliminary design of eleven feed for SKA band 1[C]//31th URSI General Assembly and Scientific Symposium. Beijing, August 16-23, 2014.
- [20] ENGARGIOLA G. Non-planar log-periodic antenna feed for integration with a cryogenic microwave amplifier[C]//Proceeding of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, June 16-21, 2002: 140-143.
- [21] CORTES-MEDELLIN G. Non-planar quasi-self-complementary ultra-wideband feed antenna[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2011, 59(6): 1935-1944.
- [22] GAWANDE R, BRADLEY R. Towards an ultra wideband low noise active sinuous feed for next generation radio telescopes[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2011, 59(6): 1945-1953.
- [23] AKGIRAY A, WEINREB S, IMBRIALE W A. The quadruple-ridged flared horn: A flexible, multi-octave reflector feed spanning $f/0.3$ to $f/2.5$ [C]//7th European Conference on Antenna and Propagation, Sweden, 2013: 768-769.
- [24] 高喜, 李思敏, 刘清扬, 等. 宽带、双极化四脊喇叭馈源研究[J]. 电波科学学报, 2013, 28(4): 337-340.
GAO X, LI S M, LIU Q Y, et al. Broad and dual-polarization feed source[J]. Chinese journal of radio science, 2010, 28(4): 337-340. (in Chinese)
- [25] GUNST A W, BENTUM M J. The LOFAR phased array telescope system[C]//IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Boston, October 12-15, 2010: 632-639.
- [26] KANT G W, PATEL P D, WIJNHOLDS S J, et al. EMBRACE: A multi-beam 20,000-element radio astronomical phased array antenna demonstrator[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2011, 59(6): 1990-2003.
- [27] VAN ARDENNA A, BREGMAN J, VAN CAPPELLEN W A, et al. Extending the field of view with phased array techniques: results of European SKA research[J]. Proceeding of IEEE, 2009, 97(8): 1531-1542.
- [28] WILLIAMS C, WILLIAMS A, WHITNEY A R, et al. The Murchison Widefield Array: design overview[J]. Proceeding of IEEE, 2009, 97(8): 1497-1506.
- [29] ELLINGSON S W, CLARKE T E, AARON COHEN, et al. The long wavelength array[J]. Proceeding of IEEE, 2009, 97(8): 1421-1430.
- [30] BRAUN R, VAN CAPPELLEN W A. Aperture arrays for the SKA: dense or sparse? [R/OL]. SKA Memo 87. 2006 [2015-06-13]. <http://arxiv.org/ftp/astro-ph/papers/0611/0611160.pdf>.
- [31] DEWDNEY P. SKA1 system baseline design [R/OL]. Square Kilometre Array Organization. 2013 [2015-06-13]. http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2012/07/SKA-TEL-SKO-DD-001-1_BaselineDesign1.pdf.

作者简介

伍洋 (1984—), 男, 安徽人, 中国科学院国家天文台博士后. 研究方向为射电望远镜天线与馈源技术.

杜彪 (1962—), 男, 河北人, 中国电子科技集团公司第五十四研究所研究员, 博士, 博士生导师, 所首席专家, 所副总工程师, 中国电子学会高级会员. 研究方向为卫星通信地球站天线、微波天线和馈源系统.

金乘进 (1972—), 男, 吉林人, 中国科学院国家天文台研究员, 博士, 博士生导师, FAST 工程接收机与终端系统总工程师, 中国电子学会高级会员. 研究方向为天体物理、射电天文技术、射电天文馈源与接收机.

彭勃 (1964—), 男, 湖南人, 中国科学院国家天文台研究员, 博士, 博士生导师, SKA 国际组织科学董事 FAST 工程副经理, 中国电子学会高级会员. 研究方向为天体物理、射电天文技术与方法.