

500米口径球面射电望远镜（FAST）主要应用目标概述

严俊^{1,2}, 张海燕^{1,2}

(1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101; 2. 中国科学院FAST重点实验室, 北京 100101)

摘要: 500米口径球面射电望远镜（Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST）已完成建设, 调试与试运行以来发现超过100颗新脉冲星, 于2020年1月通过国家验收。作为世界最大和最灵敏的单口径射电望远镜, FAST为众多科学发现提供了前所未有的机遇。在国家重大需求方面, FAST具有重要的应用价值。本文对FAST的主要应用目标进行了研讨, 包括在深空探测方面, FAST将把我国空间测控能力提升至太阳系外缘; 在脉冲星自主导航方面, FAST将大幅提升脉冲星脉冲到达时间的测量精度, 建成国际领先的高精度脉冲星计时阵, 进行空间飞行器的自主导航; FAST作为非相干散射雷达的接收系统, 将提供高分辨率和高效率的地面观测; 利用FAST进行高分辨率微波巡视, 可以识别微弱的空间信号, 为搜寻地外理性生命和国家安全服务。随着FAST的正式运行, 它将在推动应用课题研究方面发挥重大作用。

关键词: 射电望远镜; FAST; 应用目标

中图分类号: P161

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2020)02-0128-08

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20190618003

引用格式: 严俊, 张海燕. 500米口径球面射电望远镜（FAST）主要应用目标概述[J]. 深空探测学报, 2020, 7(2): 128-135.

Reference format: YAN J, ZHANG H Y. Introduction to main application goals of Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(2): 128-135.

引言

20世纪90年代初, 鉴于国际已有的射电望远镜已不能满足日益发展的科学需求, 国际天文界提出在世纪之交建造大型射电望远镜的建议, 聚焦天体物理的众多前沿和热点课题, 促进人类对宇宙演化的理解^[1-2]。为此, 中国科学家创新地提出利用中国贵州喀斯特洼地, 独立研制一台新型的大口径天线, 即具有500 m口径的球面射电望远镜（Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST）^[3]。

1994年, 我国开始启动大射电望远镜的选址及预先研究, 2007年, FAST作为“十一五”国家重大科技基础设施建设项目立项^[4-5]。FAST项目的目标是遴选出适合的贵州天然喀斯特洼坑, 作为望远镜的建设地点, 建造世界第一大的单口径射电望远镜——具有500 m口径主动反射球面的大型射电望远镜, 开展高灵敏度的射电观测（图1）。FAST在预研阶段提出了3项创新的设计理念: 在台址方面, 结合望远镜的技术指标要求, 选择了贵州的天然喀斯特洼坑——大窝凼作为建

设地点; 在洼坑内建设直径为500 m的球冠状主动反射面, 由数千块反射面单元拼接而成, 用来收集宇宙天体发出的无线电波; 通过搭建柔索驱动机构, 并在馈源舱内采用并联机器人系统, 从而满足了望远镜对于馈源高精度定位的需求。基于这些创新的设计, FAST开创了建设超大型射电望远镜的新模式^[6]。



图1 FAST全景图
Fig. 1 FAST panorama

FAST作为国家大科学装置, 为多学科基础研究提供了重要平台^[7]。主要的科学目标包括:

1) 对宇宙中的中性氢开展巡天, 研究星系的结

收稿日期: 2019-06-18 修回日期: 2019-09-17

基金项目: 中国科学院天文大科学研究中心2019年度前瞻课题; 中国科学院战略性先导科技专项（B类）资助项目（XDB23000000）; 对外合作重点项目（114A11KYSB20160008）

构，探索宇宙起源和演化；

2) 发现和探测脉冲星与快速射电爆，进行稀有品种射电瞬变源的巡天，探测引力波等；

3) 作为最大的单元参与国际低频甚长基线干涉测量网，有效提高基线灵敏度，开展高分辨率观测与研究，获得天体超精细结构；

4) 探测宇宙中的星际分子，促进对恒星形成与演化的理解，探寻宇宙生命的起源；

5) 搜索可能的星际通讯信号，寻找地外理性生命等。

FAST投入使用后，将大幅增加可观测的天体数目，发现更多特殊的天体和天文现象，从而为天文学家提供开展理论分析与模型构建的丰富样本，为重大发现提供了前所未有的机遇^[8]。

FAST主要的技术指标见表1。该项目由中国科学院和贵州省人民政府联合共建。项目主要建设内容如下：

表1 FAST主要技术指标	
Table 1 General technical specifications of FAST	
名称	设计指标
主动反射面	半径约300 m，口径约500 m，球冠张角约120°
有效照明口径	大约300 m
焦比	约为0.46
天空覆盖	最大天顶角40°，实现观测跟踪4~6 h
观测频率	70 MHz~3 GHz
灵敏度（L波段）	系统噪声温度大约20 K；望远镜有效面积与系统噪声温度之比大约2 000 m ² /K
偏振	全偏振（双圆或双线偏振），极化隔离度优于30 dB
分辨率（L波段）	2.9′
多波束（L波段）	19个波束
观测换源时间	<10 min
馈源指向精度	8″

1) 洼地的勘察与开挖：根据望远镜建设要求，对台址的工程地质情况，以及水文地质条件进行勘察，开挖洼地，进行边坡治理，确保洼地不积水；

2) 主动反射面：构建球冠型索膜结构，球冠张角大约120°，包括近9 000根钢索和4 000多个反射单元，反射面直径大约500 m。对于变形后的抛物面，要求均方差不高于5 mm；

3) 馈源支撑：利用6个支撑塔以及柔性钢索，组建馈源支撑系统。同时，通过在馈源舱内，安装二次精调装置——并联机器人，使得调整后的定位精度达到10 mm；

4) 测量与控制：依托基础测量网，采用总线及多层控制技术，实现数千点的自动控制，保障望远镜协

调运行。运用多种测量设备，包括激光全站仪、GPS测量系统等，实现在百米距离测量尺度上，最终精度达到2 mm；

5) 接收机与终端：研制7套高性能接收机，工作频率覆盖范围：70 MHz~3 GHz，满足科学目标的需求。研发包括馈源（含L波段国际领先的19波束馈源）、低噪声的制冷放大器、宽频带的数字中频传输设备、高稳定性与精度的频率时标设备和多功能数字终端设备等；

6) 观测基地建设：为高水平地支持望远镜科学观测、日常运行与维护、望远镜的技术研发，并能满足基地人员工作与生活的需要，建设望远镜观测与控制、数据处理与存储中心；建设技术实验室；配套各类生活设施等^[9-10]。

FAST工程于2011年3月25日开工建设，2016年9月25日竣工，进入调试试观测阶段^[11-12]。2020年1月，FAST通过国家验收。

“中国天眼”——FAST，是世界具有最大口径和超高灵敏度的射电天文望远镜，它的关键技术具有中国的自主知识产权，望远镜的综合性能领先国际其它在运行的设备。随着FAST的运行，它将为我国在相关学科实现重大原创突破提供了平台和机遇，实现了我国射电天文观测设备由追赶到领先的跨越。

在FAST工程建设过程中，由于其对生产技术的高苛要求，促进了相关生产企业的技术进步，有效提升了我国相关技术领域和产业的研发水平，促进了技术的自主创新。例如，由于FAST对钢索性能的高要求，相关企业建立了高精度索结构生产体系，推动了我国索结构工业由粗放式管理向精细化管理的转变，该生产体系已在其它工程项目中得到应用，使我国的钢索结构生产制造水平得到很大提升。同时，随着FAST的建设，还促进了我国在天线技术、并联机器人、高精度动态测量、电子技术、结构工程、动光缆技术和电磁兼容技术等众多高科技领域的发展^[13-14]。

1 调试进展

FAST竣工后，进入调试阶段。经过2年多的调试，创建了基于力学仿真技术的实时安全评估系统；研制了基于惯导的多系统数据融合测量技术并安装成功；研制了新型的高压滤波器；19波束接收机安装完成并投入使用；指向精度已经达到16″的水平；随着测量精度不断提高，望远镜的灵敏度已超过2 600 m²/k；完成了望远镜多系统之间的功能性整合，实现了漂移、跟踪、运动扫描、编织扫描等多种观测模式，达

到了验收技术指标^[15]。

2017年10月10日,发布FAST取得的首批成果,包括6颗新脉冲星。其中第一颗编号J1859-01(又名FP1-FAST pulsar #1),自转周期为1.83 s,据估算距离地球1.6万光年,于8月22日在南天银道面通过漂移扫描发现(见图2),9月10日由澳大利亚Parkes望远镜认证。这是我国射电望远镜首次发现新脉冲星^[16]。



图2 FAST探测到第一颗新脉冲星示意图

Fig. 2 The sketch map of the first new pulsar detected by FAST

2018年2月27日,通过跟踪伽马射线点源,第一颗毫秒脉冲星J0318+0253被FAST探测到,它的自转周期为5.19 ms,距离地球约4 000光年。基于国际合作,费米伽马射线卫星大视场望远镜(Fermi-LAT)对这颗脉冲星进行了确认。这是迄今人类所探测到的最微弱高能毫秒脉冲星之一。鉴于在运行的国际其它大型望远镜,都未能先于FAST搜索到这个源的射电脉冲,该成果充分体现了FAST在灵敏度上的优势^[17]。

2018年5月23日,由中国-澳大利亚联合研制的L波段FAST 19波束接收机,安装在馈源舱内Stewart平台的下平台上(见图3)。该接收机的噪声温度低至9 k,大幅提高了望远镜的巡天效率,接收机整体性能达到国际领先水平^[18]。



图3 FAST 19波束接收机安装在馈源舱内Stewart平台的下平台上

Fig. 3 FAST 19-beam receiver installed on the lower platform of the Stewart platform in the feed cabin

2019年,FAST全年试观测有效机时超3 000 h。截至2019年12月,已证实发现脉冲星超过100颗,其中一

颗是迄今为止流量最暗弱的一颗毫秒脉冲星。

2 主要应用目标

作为一个巨大的地面接收设备,FAST的主要特色是工作在70 MHz~3 GHz频段的最灵敏单口径射电望远镜,将可以探测到更微弱的来自天体及人造无线电设备的信号,从而提升我国在相关国家重大战略需求方面的能力。

FAST在深空探测、空间环境研究、国家安全等方面有重要应用价值,符合《国家中长期科学和技术发展规划纲要》中的重点领域及其优先主题,顺应军民融合、保障国家安全和增强综合国力的战略。

FAST天空覆盖可以达到天顶角40°,是美国Arecibo 305 m射电望远镜的两倍,而望远镜灵敏度比Arecibo望远镜高3倍多。在应用课题方面,FAST可以接收到更大天区、更微弱的无线电信号,在深空探测、脉冲星计时阵、非相干散射雷达接收和微波巡视等方面具备更高探测能力。其中,在非相干散射雷达的应用方面,FAST由于只接收无线电信号,需要与其他雷达站联合观测;而美国Arecibo望远镜由于配备了兆瓦级的发射机,可以自发自收^[19]。

2.1 空间飞行器的测控与通讯

人类文明通过对空间的探索,研究宇宙天体的演化,探寻生命的起源,评估空间环境与人类生存的关系,搜寻可能的地外生命。太空作为继陆地、海洋、天空之后的又一个战略制高点,对它的探索融合了数学、物理、天文、地球与生命科学等各类学科,集成了几乎所有的新技术领域^[20]。

作为空间科学三大支撑技术之一,空间飞行器的测控与通讯为深空探测的顺利进行提供了必不可少的重要保障^[21]。2004年3月,中国启动了探月“嫦娥工程”第一阶段工程;2007年11月,“嫦娥1号”卫星成功进入绕月轨道并发回精美月球图片;2019年1月,“嫦娥4号”探测器在月球背面成功着陆^[22]。在探月工程启动前,我国在用的是由口径10 m左右的天线,组成的USB控制与通讯网,可以满足地球同步轨道范围约3.6万km远的高信噪比通讯需求。为满足“嫦娥工程”与未来火星探测等深空探测的需求,在现有的新疆乌鲁木齐25 m口径与上海25 m口径射电望远镜的基础上,我国陆续建设了北京密云50 m口径、云南昆明40 m口径、上海65 m口径、黑龙江佳木斯66 m口径等天线,组成了中国的甚长基线干涉测量网(Very Long Baseline Interferometry, VLBI),一方面开展科学研究,另一方面参与探月工程的测定轨和数据接收^[23]。

作为具备探测微弱无线电信号能力的低频接收设备, FAST的直径有500 m, 它的主动反射面与柔性馈源支撑系统, 使得望远镜可观测天顶角 $0\sim 40^\circ$ 的天区, 加以高性能的接收机终端, 将大幅提升我国深空测控和通讯的能力。FAST作为中国VLBI网的核心成员^[24], 将有效提高未来深空飞行器的测轨与定轨精度^[25]。对于深空飞行器在快速工程变轨和行星着陆时的测控需求, FAST也能提供有力支撑。以美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 发射的火星探测器“勇气号” (Spirit) 和“机遇号” (Opportunity) 为例, 它们在变轨着陆火星时, 测控过程使用了工作在低频的全向低增益天线。这类天线具备较大的有效接收面积, 同时由于低频的无线电信号具有较好绕射特性, 有利于信号的传输^[26]。

未来国际空间探测计划要求地面和空间站向Ka甚至更高频段发展, 以获得高的下行数据传输率。与此同时, 为实现飞行器或着陆器在木星、土星和土卫六这些天体厚密大气底层与地球之间的直接通讯, 需要1 GHz之下的巨大口径低频深空站, 其优化的工作频段应该在200~400 MHz。假设空间探测器上的全向发射功率为几瓦水平, FAST与探测器的通讯能力在10~100 bps, FAST在这一领域具有优势。

2.2 脉冲星自主导航

毫秒脉冲星作为脉冲星的一类, 它的自转频率非常稳定。经过长期的计时观测发现, 对比一些实验室保持的原子时标准, 对于部分毫秒脉冲星, 它们的自转频率长期稳定度要优于原子时标准 (见图4)。因此, 毫秒脉冲星也常被称为天然时钟^[27]。以毫秒脉冲星PSR B1855+09为例, 基于15年以上的观测结果发现, 它的自转频率长期稳定度要优于美国海军天文台

(United States Naval Observatory, USNO) 原子时, 与德国技术物理研究院 ((Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) 的原子时PTB则比较接近。对于新探测到的毫秒脉冲星PSR J0437-47, 其计时观测虽然只积累了约4年的数据, 但在时间 $\tau > 1$ 年的情况下, 与USNO和PTB两原子时系统, 以及PSR B1855+09相比, 自转频率的稳定度都较好。此外, 毫秒脉冲星PSR J1640+22、PSR J1713+07、PSR B1937+21等的脉冲到达时间 (ToA) 长期观测结果也已陆续公布^[28]。

基于原子时 (Atomic Time, AT) 的现状与发展, 结合脉冲星时 (Pulsar Timing, PT) 的特性, 在时间标准中, 毫秒脉冲星的预期应用包括:

1) 结合原子钟与脉冲星进行守时。原子钟的短期稳定度较高, 与之相比, 毫秒脉冲星的长期稳定度高, 两者结合进行守时, 将可以优势互补。在不增加守时原子钟数量的情况下, 通过利用毫秒脉冲星参与守时, 可以改进原子时的长期稳定度。

2) 构建脉冲星时。基于算法的研发, 通过遴选多颗毫秒脉冲星构建综合脉冲星时, 将具有更高的长期稳定度。更重要的是, 以毫秒脉冲星自转为基础的脉冲星时, 在原理和机制上完全不同于原子时, 为独立地检测原子时误差提供了必要手段。

3) 高精度预报时间。毫秒脉冲星寿命长, 其精确测定的计时模型具有较高可靠性, 依此能对今后至少1年以内的时间做出高精度的预报, 这是原子钟难以做到的^[29]。

为了推进脉冲星自主导航研究, 国际射电望远镜持续开展脉冲星巡天, 不断增加毫秒脉冲星样本。先后已有约10个脉冲星计时阵 (Pulsar Timing Array, PTA), 开展工作^[30]。这里所指的PTA, 不是传统意义的由天线进行组阵, 而是选定一组10~20颗自转稳定度较高的毫秒脉冲星, 按照规范的程序, 用射电望远镜进行长期计时观测, 在观测数据的基础上, 构建脉冲星时间标准。利用PTA, 一方面可以获得这些毫秒脉冲星的高精度参数, 还能够利用基于观测获得的毫秒脉冲星自转长期稳定度, 来校验原子时误差, 因此, 为建立独立于原子时的脉冲星时间标准提供了可能。随着FAST的正式运行, 所开展的高精度脉冲星计时观测, 将促进脉冲星时间标准的建立。

利用长期的脉冲星观测数据, 可以获得脉冲星天体测量与天体物理的精确参数, 比如脉冲星的脉冲周期及其变化规律、位置、自行等, 遴选那些具有稳定自转特性的脉冲星, 建立精确的计时模型, 也被称为脉冲星钟。对于空间飞行器, 可以不依赖任何人工信

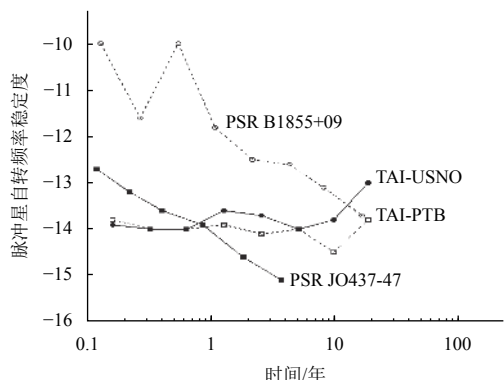


图4 毫秒脉冲星与原子时频率稳定度的比较
(纵轴为频率稳定度的对数值)

Fig. 4 Comparison of the frequency stability between the millisecond pulsar and atomic time (the vertical axis shows the logarithmic value of the frequency stability)

标,通过实时观测这些脉冲星,来确定飞行器的空间坐标及飞行速度,进行自主导航^[31]。脉冲星导航的优点包括:首先,规避了插播式和全球定位系统(Global Positioning System, GPS)等的信标安全问题;其次,避免了当飞行器与地球位于太阳两侧,引发的通讯问题;此外,可在全天提供满意的精度,而地面深空网通常只在飞行器的视线方向满足要求;同时,定位精度不受距离地球远近的影响。因此,脉冲星导航可作为未来导航发展的重要技术。

脉冲星导航在我国得到了科学验证,如利用“天宫2号”上的伽玛射线暴偏振探测器(POLAR)对蟹状星云脉冲星探测,完成了我国首次脉冲星导航空间实验,验证了脉冲星导航的可行性^[32];基于脉冲星导航实验卫星(XPNAV-1),开展X射线脉冲星在轨观测,验证X射线脉冲星导航相关技术^[33];利用慧眼卫星的X射线调制望远镜,研究如何进一步提高脉冲星导航精度等^[34]。

FAST将在3个方面有所作为:

- 1) 发现更多自转稳定的“好”脉冲星;
- 2) 检测射电安静的X射线脉冲星的微弱射电辐射,或者从已发现的X射线点源中认证脉冲星;
- 3) 通过精确的脉冲星到达时间测量,较快地制作精确脉冲星钟模型^[35]。

通常,射电望远镜的口径正比于脉冲星的测量精度。以乌鲁木齐25 m天线为例,当它观测某颗脉冲星1 h,获得该星到达时间的测量精度是13.7 ms,相应的空间尺度大约为4 km;当FAST观测同一颗脉冲星时,所获得的空间尺度提升到大约30 m。因此,利用FAST开展长期的脉冲星监测,所积累的数据将为飞行器自主导航提供更高精度的脉冲星钟。

2.3 非相干散射雷达接收系统

中国子午工程建造了一条目前世界上跨度最长、监测方法和手段最全、同时综合性最高的空间环境地基监测子午链,其中的重要组成部分就包括研究高空大气物理最理想的地面探测技术——非相干散射雷达^[36]。非相干散射雷达通过高空大气中等离子体与电子热起伏的微弱散射信号,来测量高空大气物理参数,由于这种热起伏引起的散射信号具有非相干的特性,因此相应的探测雷达被称为非相干散射雷达。大气中的非相干散射信号的功率谱,与所探测等离子体的速度分布函数成正比,利用非相干散射雷达,可以直接测量等离子体的各种物理参数^[37]。比如,可以同时测量70~1 000 km,甚至更大范围内不同高度上的高空大气参数,包括离子的温度、成分、碰撞频率和

速度;电子的密度和温度;不均匀体后向散射和回波相关时间等。对于子午工程中的非相干散射雷达系统,预期将在对流层与平流层、中低纬中层与低热层物理过程、低纬电离层动力学、电离层-热层耦合、磁层-电离层耦合等研究方面取得重大成果^[38]。

为了探测高层大气热起伏的微弱散射信号,要求非相干散射雷达具备很大的发射功率和天线口径,以满足探测所需的信噪比。例如美国国家电离层中心利用美国Arecibo 305 m望远镜作为非相干散射雷达,它的发射功率在峰值时可超过3 MW。在工作频率的选择上,非相干散射雷达通常采用甚高频以上的频率,这是为了避免比非相干散射信号强得多的电离层反射信号影响探测结果。

FAST具备探测极其微弱无线电信号的能力,可以作为强大的非相干散射雷达接收系统。通过在FAST望远镜上,安装相应的接收机,与非相干散射雷达同时观测时,可以单站和双站的形式工作,从而提升探测效率。开展非相干散射雷达探测需要的频段在327~611 MHz频率区间,而FAST的观测波段为70 MHz~3 GHz,同时望远镜的中频和终端具备提供4 MHz、8 MHz和20 MHz可选带宽的能力。FAST的天线增益大于65 dB,补偿了发射天线口径较小的不足,可以更加精确地测量各种物理参数。FAST高灵敏度可提升致密散射源的探测能力约200倍,它的高空间分辨率,使得探测散射回波的能力提高约14倍。此外,由于FAST具备多波束馈源,并可进行高效率的宽视场观测,获得二维等离子体的运动速度等参数。随着FAST参与非相关散射雷达探测,将大幅提升我国非相干散射雷达的探测能力。

2.4 微波巡视

FAST原始灵敏度极高,接收系统具备宽频带和高采样率,因此FAST可以开展高时频分辨率的观测。由于受光速极限速度的限制,通过星际旅行来穿越恒星之间的遥远距离无法实现,对地外理性生命(Search for Extra Terrestrial Intelligence, SETI)进行搜寻的候选方法之一,就是对来自地外理性生命的“人工”无线电信号进行探测。作为一个强大的被动接收设备,FAST将可用于宇宙文明信号的搜寻。

如果在FAST上,安装地外理性生命探测的终端设备^[39],它将以超高的灵敏度来探测来自地面和空间的各种无线电信号。对于在大气中运动的飞行器,所产生的静电放电现象比通讯信号更为微弱,对于这类飞行器辐射,FAST也有可能进行探测。FAST作为一个大型地面射电天文接收设备,不能快速地跟踪运动物

体, 视场有一定限制, 因此可以作为被动的监测系统。

FAST巨大接收面积提供的电磁波收集能力, 把望远镜接收电磁波的时间分辨率和频谱分辨率都提高到了新的水平, 打开了探测瞬变和动态目标的新窗口, 而如何利用新的探测手段对宇宙空间天体和近地目标进行探测是我们面临的全新技术挑战。另一方面, 人类活动产生的大量电磁辐射对高精度的天文观测产生严重干扰, 甄别和区分人为信号和天体信号是FAST开展天文观测获得新发现的必要前提^[40]。利用FAST开展微波巡视, 对来自空间的无线电信号进行高时间分辨率和高频谱分辨率的快速采样, 提取和分析空间窄带频谱信号特征, 分清宇宙信号和人工干扰信号的特征, 将大幅度提升我国探测空间暗弱瞬变目标的能力。

国际上很多国家都在推动开展高分辨率微波巡视(High Resolution Microwave Survey), 通过对上亿个频率信道的巡视, 以求探测各类微弱空间窄带讯号。目前, 美国的SETI团队正使用世界上大口径天线, 如美国绿岸天文台的GBT 100 m天线和波多黎各的Arecibo 305 m射电望远镜开展地外文明信号的搜寻, 未来将利用国际平方千米阵(Square Kilometre Array, SKA)开展SETI研究^[41]。FAST也把SETI作为研究目标之一, 计划搜索太阳系附近上千颗类太阳星周围的无线电信号。美国的Kepler探测器已经发现了上千颗太阳系外行星, 其中不乏类似地球的适宜居住、可能存在智慧生命的行星^[42]。

由于FAST的超高灵敏度, 地外文明发射的星际通讯信号, 或者强的广播电视信号是有可能被FAST探测到的。表2对比了国际主要大型射电望远镜的探测能力。作为比较, 一个典型电视台的等效全向功率大致为1 MW的量级, 而地球上大雷达的发射功率要强得多。表中其它列包含了使用的每个观测站对应1 000 MW的发射机可探测的最大距离, 以及在此距离内的类太阳星的大致数目。粗略估算, 如果使用全向天线, 当发射机功率达到1000 MW时, 澳大利亚Parkes 64 m望远镜的搜巡距离可以达到4.5光年, 在此范围内, 只能

表2 国际主要大型射电望远镜可探测的恒星数目估算

Table 2 Estimated stellar number detected by main large radio telescopes in the world

射电望远镜	发射机功率等效 全向功率/(MW)	距离/ (光年)	恒星数 目/个
Parkes (口径64 m)	1 000	4.5	1
GBT (口径100 m)	1 000	9	1
Arecibo (口径305 m)	1 000	18	12
FAST (口径500 m)	1 000	28	1 400

观测到一颗恒星——半人马 α ; 对美国Arecibo 305 m的射电望远镜, 其搜索距离可达18光年, 可以观测12颗恒星; 对于FAST, 它搜索距离为28光年, 可观测的恒星约1 400颗。因此, FAST进行微波巡视, 对地外、特别是太阳系外新发现的类地行星进行搜索, 在寻找地外理性生命迹象的同时, 通过分析和评估微弱的空间无线电信号, 服务于国家安全。

3 结束语

FAST的调试和试观测进展顺利, 通过国家验收, 已开始正式运行, 逐步向国内外用户开放使用。目前, FAST针对不同科学目标的需求, 进一步优化望远镜性能及开发新型观测模式, 建设高效的数据处理和存储中心(见图5), 促进科学成果的产出; 重点开展脉冲星探测和宇宙中性氢的巡天, 关注热点领域如快速射电爆和引力波等。



图5 FAST数字终端

Fig. 5 FAST digital backend

在应用目标方面, FAST正在进行设备调试和试验准备。如在毫秒脉冲星到达时间的观测方面, 脉冲星计时接收数字终端正在调试; 在VLBI方面, FAST与上海65 m口径的天马射电望远镜进行了联合VLBI观测, 获得首条干涉条纹, 这意味着FAST的VLBI设备初步通过调试; 联合研制的地外理性生命探测设备终端已安装在台址终端室内; FAST与国内现有设备合作, 开展非相干散射雷达信号接收试验等。

随着FAST的正式运行, 它将在国家重大战略需求方面, 有效促进我国在深空探测、空间天气等方面的研究。

参 考 文 献

- [1] 吴盛殷. 一个跨世纪工程: 新一代射电望远镜计划[J]. 天文学进展, 1995(2): 164-172.
- [2] VAN ARDENNE A. Concepts of the square kilometre array: toward

- the new generation radio telescopes[C]//IEEE Antennas-and-Propagation-Society International Symposium. [S.l.]: IEEE, 2000.
- [3] NAN R D, LI D, JIN C, et al. The Five-hundred Aperture Spherical radio Telescope (FAST) project[J]. *IJMPD*, 2011, 20(6): 989-1024.
 - [4] 邱玉海. 具有主动主反射面的巨型球面射电望远镜[J]. 天体物理学报, 1998(2): 7-10.
 - [5] PENG B, JIN C J, WANG Q M, et al. Preparatory study for constructing fast, the world's largest single dish[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(8): 1391-1396.
 - [6] NAN R D, LI D. The Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) project[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2013, 44: 12022-1.
 - [7] LI D, NAN R D, PAN Z C. The Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope project and its early science opportunities[J]. *IAUS*, 2013, 291: 325-330.
 - [8] YUE Y L, LI D, NAN R D. FAST low frequency pulsar survey[J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2013, 291: 571-577.
 - [9] 南仁东, 李会贤. FAST的进展——科学、技术与设备[J]. 中国科学, 2014, 44(10): 1063-1074.
NAN R D, LI H X. Progress of FAST in science, technique and instrument[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2014, 44(10): 1063-1074.
 - [10] NAN R D, ZHANG H Y, ZHANG Y, et al. FAST construction progress[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2016, 57(6): 623-630.
 - [11] NAN R D, ZHANG H Y. Super bowl[J]. *Nature Astronomy*, 2017(1): 12-14.
 - [12] 南仁东, 姜鹏. 500 m口径球面射电望远镜(FAST)[J]. 机械工程学报, 2017, 53(17): 1-3.
 - [13] 姜鹏, 王启明, 岳友岭, 等. FAST索网疲劳评估及高疲劳性能钢索研制[J]. *工程力学*, 2015, 32(9): 243-249.
JIANG P, WANG Q M, YUE Y L, et al. Fatigue performance evaluation of Fast Cable-Net Structures and development of a new type of steel cable system with high fatigue resistance[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(9): 243-249.
 - [14] ZHANG H Y, WU M C, YUE Y L, et al. EMC design for actuators in the FAST reflector[J]. *RAA*, 2018, 18(4): 123-128.
 - [15] JIANG P, YUE Y L, GAN H Q, et al. Commissioning progress of the FAST[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62(5): 3-24.
 - [16] QIAN L, PAN Z C, LI D, et al. The first pulsar discovered by FAST[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62(5): 71-74.
 - [17] WANG H F, ZHU W W, GUO P, et al. Pulsar candidate selection using ensemble networks for FAST drift-scan survey[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62(5): 61-70.
 - [18] SMITH S L, DUNNING A, SMART K W, et al. Performance validation of the 19-element multibeam feed for the Five-hundred-metre Aperture Spherical radio Telescope[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. [S.l.]: IEEE, 2017.
 - [19] LI Y L, ZHOU Q H. Velocity and orbital characteristics of micrometeors observed by the Arecibo 430 MHz incoherent scatter radar[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 486(3): 3517-3523.
 - [20] KILGORE, DE WITT D. The exploration of space[J]. *Science*, 2017, 358(6369): 1392-1393.
 - [21] 吴伟仁, 于登云. 深空探测发展与未来关键技术[J]. 深空探测学报, 2014(1): 5-17.
WU W R, YU D Y. Development of deep space exploration and its future key technologies[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014(1): 5-17.
 - [22] 吴伟仁, 刘继忠, 唐玉华, 等. 中国探月工程[J]. 深空探测学报, 2019, 6(5): 405-416.
WU W R, LIU J Z, TANG Y H, et al. China lunar exploration program[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(5): 405-416.
 - [23] ZHANG H Y, CHEN R R, JIN Ch J, et al. Proposed VLBI observations in the FAST commissioning stage[C]// IAU General Assembly. [S.l.]: IAU, 2018.
 - [24] ZHENG W M. The recent progress of Chinese VLBI network[C]//IAU General Assembly, Meeting. [S.l.]: IAU, 2015.
 - [25] 刘庆会, 吴亚军. 高精度VLBI技术在深空探测中的应用[J]. 深空探测学报, 2015, 2(3): 208-212.
LIU Q H, WU Y J. Application of high precision VLBI technology in deep space exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2015, 2(3): 208-212.
 - [26] BAIRD D T. Mars exploration rovers entry, descent, and landing navigation[C]//AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit. [S.l.]: AIAA, 2004.
 - [27] 杨廷高, 仲崇霞. 毫秒脉冲星计时观测进展[J]. 天文学进展, 2005, 1: 1-9.
YANG T G, ZHONG C X. Progress on millisecond pulsar timing observations[J]. *Progress in Astronomy*, 2005, 1: 1-9.
 - [28] ARZOUAMANIAN Z, BRAZIER A, BURKE-SPOLAOR S, et al. The nanograv 11-year data set: high-precision timing of 45 millisecond pulsars[J]. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 2018, 235(2): 37-47.
 - [29] LIU K, VERBIEST J P W, KRAMER M, et al. Prospects for high-precision pulsar timing[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, 417(4): 2916-2926.
 - [30] LAZIO T, JOSEPH W, BHASKARAN S, et al. Solar system ephemerides, pulsar timing, gravitational waves, & navigation[C]//Pulsar Astrophysics the Next Fifty Years, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium. [S.l.]: IAU, 2018.
 - [31] 李豪. 脉冲星自主天文导航概述[J]. 光学与光电技术, 2014(4): 78-81.
LI H. Pulsar autonomous celestial navigation[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2014(4): 78-81.
 - [32] 郑世界, 葛明玉, 韩大炜, 等. 基于天宫二号POLAR的脉冲星导航实验[J]. 中国科学(物理学力学天文学), 2017, 47(9): 116-124.
ZHEGN S J, GE M Y, HAN D W, et al. Test of pulsar navigation with POLAR on TG-2 space station[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2017, 47(9): 116-124.
 - [33] 张大鹏, 王奕迪, 姜坤, 等. XPNV-1卫星实测数据处理与分析[J]. 宇航学报, 2018, 39(4): 411-417.
ZHANG D P, WANG Y D, JIANG K, et al. Measured data processing and analysis for XPNV-1[J]. *Journal of Astronautics*, 2018, 39(4): 411-417.
 - [34] 贾淑梅, 黄跃, 马想, 等. 硬X射线调制望远镜卫星科学观测应用初步评价[J]. 航天器工程, 2018, 27(5): 168-174.
JIA S M, HUANG Y, MA X, et al. Preliminary evaluation for scientific observations application of HXMT satellite[J]. *Spacecraft Engineering*,

- 2018, 27(5): 168-174.
- [35] HOBBS G, DAI S, MANCHESTER R N, et al. The role of FAST in pulsar timing arrays[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(2): 20-29.
- [36] 黄朝辉, 袁韦华, 王霄, 等. 子午工程专题[J]. 现代物理知识, 2012, 24(5): 4-28.
- [37] ILKKA I V, BJÖRN G, ANITA A, et al. Electron energy spectrum and auroral power estimation from incoherent scatter radar measurements[J]. *Journal of Geophysical Research, Space Physics*, 2018: 6865-6887.
- [38] 丁宗华, 代连东, 杨嵩, 等. 曲靖非相干散射雷达功率谱的初步观测与分析[J]. *地球物理学进展*, 2018(6): 2204-2210.
- DING Z H, DAI L D, YANG S, et al. Preliminary measurement and analysis of the power spectra by the Qujing incoherent scatter radar[J]. *Progress in Geophysics*, 2018(6): 2204-2210.
- [39] PRICE D, MACMAHON D, LEBOFKA M, et al. The breakthrough listen search for intelligent life: wide-bandwidth digital instrumentation for the csiro parkes 64-m telescope[J]. *PASA*, 2018, 35: e041.
- [40] ZHANG H Y, WU M C, YUE Y L, et al. RFI mitigation of FAST: challenge & solution[C]// 2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC). [S.l.]: URSI, 2019.
- [41] SIEMION A P V, ARMOUR W, CHENNAMANGAIAM J, et al. Commensal searches for extraterrestrial intelligence with arecibo observatory and the green bank telescope[C]// URSI GASS. [S.l.]: URSI, 2014.
- [42] WANDEL A. How far are extraterrestrial Life and intelligence after Kepler? [J]. *Acta Astronautica*, 2016, 137: 498-503.

作者简介:

严俊(1958-), 男, 研究员, 主要研究方向: 天文学。

通讯地址: 中国科学院国家天文台(100101)

电话: (010)64881686

E-mail: yanjun@nao.cas.cn

Introduction to Main Application Goals of Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope

YAN Jun^{1,2}, ZHANG Haiyan^{1,2}

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100011, China; 2. CAS Key Laboratory of FAST, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The main structure of Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) has been completed. Till now, more than 100 new pulsars have been detected by FAST during the commissioning and test observation stage, and the project passed the national review in January 2020. Being the largest and most sensitive single-dish radio telescope, FAST will enable scientists to jump-start many science cases. Meanwhile, FAST have several application goals described in this paper. For instance, in deep space exploration, FAST will improve the ability of space measurement and control to the edge of the Solar System. Moreover, FAST will increase the measurement accuracy of the time of arrival for the pulsar to 30 ns and develop the most accurate pulsar timing array, which will work for autonomous navigation. FAST could be the receiving system of the incoherent scattering radar, providing the ground-based observation with high resolution and efficiency. By carrying out microwave survey to detect weak space signals, FAST might work for the Search for Extra Terrestrial Intelligence (SETI) and national security. After the formal operation, FAST will make significant contributions to these important application goals.

Keywords: radio telescope; FAST; application goals

Highlights:

- The largest single dish radio telescope FAST has passed the national review.
- More than 100 new pulsars have been detected by FAST.
- The application goals of FAST are prospected such as working for the deep space exploration, pulsar timing array, space weather and microwave survey.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]