

FAST VLBI系统和观测研究

陈如荣^{1,2}, 张海燕^{1,2}, 金乘进^{1,2}, 高智胜^{1,2}, 朱岩^{1,2}, 岳友岭^{1,2}, 朱凯^{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: 世界上最大的单口径射电望远镜FAST已经完成验收并正式运行, 而甚长基线干涉观测是FAST的核心课题之一, FAST可以为甚长基线观测网提供重要贡献。为了发挥FAST在甚长干涉观测网中的作用, 总结了国际上其他大型射电望远镜的主要研究成果, 结合FAST的特点, 挑选适合FAST的研究课题; 介绍了FAST现有的VLBI观测系统, 和天马望远镜进行的VLBI干涉条纹; 讨论了FAST VLBI系统的发展, 包括未来适合FAST参与的VLBI观测网。研究最终挑选到了适合FAST VLBI的6个研究课题; 应用FAST与天马望远镜获得了首条VLBI干涉条纹; FAST在CVN、EVN、LBA的VLBI观测方面, 可发挥其极高灵敏度的优势; 研究发现附近的小天线可为FAST参加相位参考观测提供帮助。

关键词: FAST; VLBI; 相位参考

中图分类号: P164

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2020)02-0136-08

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20190618001

引用格式: 陈如荣, 张海燕, 金乘进, 等. FAST VLBI系统和观测研究[J]. 深空探测学报, 2020, 7(2): 136-143.

Reference format: CHEN R R, ZHANG H Y, JIN C J, et al. VLBI system and scientific research of FAST[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(2): 136-143.

引言

甚长基线干涉 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) 技术从20世纪60年代发展至今, 已经广泛应用于天体高分辨率成像、航天器定位、天体测量和大地测量等领域, 是一种重要的天文技术方法。

FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope) 是目前世界上口径最大的单口径射电天文望远镜, 于2016年9月建造完成^[1]。通过几年的调试, FAST的性能日臻完善, 目前已经通过工艺验收, 各项性能指标均已达到验收标准^[2]。在调试过程中, 已经产生多项科学成果^[4-6], 目前已经对国内天文学家开放观测时间。

大型射电天文望远镜都在参加VLBI观测网, 从设计之初, VLBI就是FAST的核心课题之一^[1], 并为此建立了一套FAST VLBI系统。FAST未来也将凭借其口径为VLBI观测网贡献高灵敏度的基线。为了使FAST更好地参与VLBI观测, 有必要对现有大型射电望远镜参与其研究的情况进行梳理, 并基于FAST的特点, 探讨适合FAST参与的VLBI研究课题, 为接下来FAST的VLBI观测规划做铺垫。

本文第1节将介绍3台100 m级口径射电望远镜参与VLBI研究的情况; 第2节将介绍FAST VLBI系统、适合FAST参与的VLBI研究课题、条纹测试实验和FAST未来的VLBI规划; 第3节为文章总结。

1 大型射电望远镜的VLBI研究

1.1 阿雷西博望远镜的VLBI研究

“阿雷西博” (Arecibo) 望远镜位于美属波多黎哥, 于1963年建成, 口径达305 m, 是FAST建成前世界上口径最大的单口径射电望远镜。Arecibo望远镜从1997年开始参与 VLBI 观测, 最开始参与日本 8 m 口径空间射电望远镜 HALCAL (Highly Advanced Laboratory for Communication and Astronomy) 的 VLBI 观测计划 VSOP (VLBI Space Observatory Program)。2001年安装了VLBI数据采集系统Mark6, 开始能够参与美国或欧洲的VLBI观测网。目前它是欧洲VLBI观测网 (European VLBI Network, EVN) 的成员, 也能参与高灵敏度阵 (High Sensitivity Array, HSA) 和全球VLBI网 (Global VLBI) 的观测, 每年可有4%的观测时间分配给VLBI观测。

收稿日期: 2019-04-01 修回日期: 2020-01-30

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; 国家自然科学基金资助项目 (U183112); 中国科学院战略性先导科技专项 (B类) (XDB23000000); 对外合作重点项目 (114A11KYSB20160008)

目前,阿雷西博望远镜可以参与92、49、30、21、18、13、6、5和3.6 cm波段的VLBI观测,依靠大口径的优势,为VLBI观测带来灵敏度的提升,为VLBI科学做出了显著贡献,主要体现了以下几个科学亮点。

1) 参加高灵敏度阵HSA,利用三角视场法测量卯星团距离

卯星团是被研究最多的星团,也是被用来定义“老年主序”的星团之一,因此可以利用主序拟合来确定其他星体的距离。但卯星团本身的距离仍存在争议,不同测量方法之间存在偏差。比如“依巴谷”(High Precision Parallax Collecting Satellite, HIPPARCOS)卫星测得距离为120 pc差距,相比其它方法测得的133 pc差距存在10%的偏差。为了正确测量卯星团的距离,Melis等利用HSA对卯星团中的射电恒星进行了三角视差测距,最初得到几次测量结果,与依巴谷卫星测量值不符^[17]。

2) 参加空间VLBI观测,利用脉冲星观测发现可以散射脉冲星辐射的等离子云

和荷兰WSRT(Westerbork Synthesis Radio Telescope)望远镜一起参与俄罗斯RadioAstron空间望远镜的VLBI观测,观测频率为324 MHz,最大基线长度为 2.2×10^5 km,角分辨率可达0.87毫角秒。观测脉冲星PSR B0950+08,发现两块尺寸分别为4.4~16.4 pc差距和26~170 pc差距的等离子云对脉冲星的辐射产生了散射作用^[18]。

3) 参加空间VLBI观测,测量到3C273的亮温度

与美国GBT一起参加俄罗斯RadioAstron望远镜的VLBI观测,观测波长为18 cm,最大基线长度为 3.24×10^5 km,角分辨率为0.11毫角秒。通过对3C273的测量发现其亮温度超过 10^{14} K,这个数值超过逆康普顿冷却的上限 10^{12} K或者磁场和粒子能量平衡态时的 10^{11} K。另外,甚长基线阵(Very Long Baseline Array, VLBA)对3C273进行了15年左右的监测,发现其洛伦兹系数为10~15,使得如此高的亮温度更加难以理解,需要新的理论模型来解释^[19]。

4) 参加全球VLBI观测,发现三黑洞体系

Deane等通过6 cm和18 cm的Global VLBI观测发现一个含有3个黑洞的系统,红移为0.39。其中最近的两个黑洞相距约140 pc差距,并使得喷流呈现螺旋结构,可为今后发现类似的紧密双黑洞系统提供线索^[20]。

1.2 绿岸望远镜的VLBI研究

绿岸望远镜(Green Bank Telescope, GBT)位于美国西弗吉尼亚州,主反射面口径为100 m × 100 m,是世界上口径最大的全可动单天线射电望远镜。

GBT采用高表面精度的全铝反射面,工作频率范围为0.1~116 GHz,并为了高效利用反射面,采用无遮挡的偏馈结构。2000年GBT建成,开始进行VLBI测试,由于其大口径、工作频率宽的特点,除了参与EVN、HSA的VLBI观测,还能参与毫米波VLBI阵GMVA(Global Millimeter VLBI Array)的观测,另外经常与太空望远镜RadioAstron组成空间VLBI观测阵。

GBT参与的VLBI观测,除了喷流和脉泽这两个常见的VLBI课题外,还涉及三角视差测距、脉冲星和黑洞运动、系外行星搜索等课题。下面列出GBT获得较多观测时间的VLBI研究课题。

1) 活动星系核巡天

Kovalov利用GBT和俄国10 m口径太空射电望远镜RadioAstron,以及EVN、VLBA,在0.34、1.68和22 GHz这3个波段,对活动星系核进行巡天观测,研究活动星系核中射电喷流的内部结构和外部星系介质的性质^[21],至今已经获得GBT共293个时间段的观测,是GBT分配时间最多的VLBI观测项目。

2) 星系外行星搜寻

Bower等利用GBT和VLBA的VLBI观测,对近邻的低质量M型恒星进行高分辨率的天体测量,希望得到行星-低质量恒星的特征信息,从而研究M型矮星是否和FGK型恒星一样,经常伴有行星系统,以及行星的质量-公转周期关系随不同的恒星类型有怎样的变化^[22]。至今获得GBT共197个时间段的观测,观测频率为8.4 GHz。

3) 卯星系团VLBI测距

Melis等利用HSA观测阵对卯星系团中的射电星进行三角视差测距观测,发现所得结果与依巴谷卫星的结果也存在10%的偏差,从而使用独立的三角视差测距法确认了卯星系团距离^[17]。项目至今获得GBT共112个时间段的观测,观测频率为8.4 GHz。

4) 巨脉泽宇宙学

Braatz等利用GBT、VLBA、埃菲斯伯格(Effelsberg)望远镜的VLBI观测,对水巨脉泽进行成图观测,希望得到超过10个的水巨脉泽的距离,从而能够确定哈勃常数,并且误差控制在小于3%^[23]。项目由4部分组成:①GBT的巡天观测,从而发现最佳候选体;②GBT的监测,测量加速度;③VLA的快照观测,获得VLBI观测的校准源;④VLBI成图观测。目前已经获得GBT共108个时间段的VLBI观测,观测频率为23 GHz。

1.3 Effelsberg望远镜的VLBI研究

Effelsberg 100 m射电望远镜位于德国西部的北莱

茵-威斯特法伦州，主反射面口径 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ ，建于20世纪70年代，由德国马普所（Max Planck Institute, MPI）运行，是美国GBT望远镜之前口径最大的全可动射电望远镜。Effelsberg望远镜采用中心实心铝板加外围铝网的结构，工作频率为 $0.3\sim 96\text{ GHz}$ 。

从1980年开始，Effelsberg望远镜就作为核心成员参与欧洲VLBI观测网（EVN），开始VLBI的观测研究。与GBT类似，Effelsberg望远镜利用其高灵敏度和宽频率覆盖的特点参加HSA和GMVA的观测。

Effelsberg望远镜参与了很多VLBI研究，包括：

1) 致密陡谱源的多尺度研究

Snellen等利用EVN和VBLA的观测研究GPS（Gigahertz-Peaked-Spectrum）的特性随射电光度、红移、尖峰频率的变化关系，发现GPS源与致密陡谱源（Compact Steep Spectrum, CSS）的特性类似，以自相似的方式从年轻射电源演化而来^[24]。

2) 致密对称源0710+439的动力学研究

通过对致密对称源（Compact Symmetric Object, CSO）的多历元高分辨率观测，测得CSO成分的运动速度，推得CSO的演化速度和动力学年龄，对CSO是年轻射电源并将演化成更大尺度的对称射电源的论点提供支持^[25]。

3) 射电星系的样本研究

通过对射电星系多历元的高分辨率观测，研究射电喷流的特性和演化过程^[26]。

4) 甲醇脉泽的研究

通过对恒星形成区的甲醇脉泽的成图观测发现，大部分成延展结构且具有线性速度梯度，这与侧视的旋转吸积盘模型匹配。通过动力学分析，得到质量信息，对恒星形成模型进行限制^[27]。

5) B0218+35.7引力透镜研究

通过对引力透镜系统B0218+35.7中爱因斯坦环上的两个射电辐射亮区进行高分辨率成图观测，发现两个亮区中各自含有两个射电子结构，子结构的强度比一致，且尺度随频率增大^[28]。

6) 银河系的天体测量

利用三角视差法测量银河系悬臂上恒星形成区附件的水脉泽和甲醇脉泽，得到螺旋角和银心距，从而研究银河系悬臂结构^[29-30]。

2 FAST的VLBI研究

2.1 FAST VLBI系统

FAST VLBI系统主要由望远镜前端的馈源、后端的终端、时频系统、存储系统、数据处理系统和运行

控制系统组成。

目前FAST拥有7套馈源，从 $70\text{ MHz}\sim 3\text{ GHz}$ （表1），这些接收机都可以进行VLBI观测。其中，为巡天设计的19波束接收机，因其具有19个波束，L波段的视场从3角分扩展至23角分，这有利于将来的相位参考观测。

表1 FAST现有7套接收机^[1]

Table 1 Seven sets of FAST receivers^[1]

序号	波段/GHz	波束	偏振	制冷
1	0.07~0.14	1	左旋、右旋	否
2	0.14~0.28	1	左旋、右旋	否
3	0.27~1.62	1	左旋、右旋	是
4	0.56~1.02	1	左旋、右旋	是
5	1.15~1.72	1	左旋、右旋	是
6	1.05~1.45	1	左旋、右旋	是
7	2.00~3.00	1	左旋、右旋	是

VLBI观测依赖于时间记录，需要高精度、高稳定性的时间/频率系统。目前FAST使用的是稳定性最好的氢原子钟，配合全球定位系统（Global Positioning System, GPS）提供的秒信号（a Pulse Per Second, 1PPS），另外还有脉冲均分放大器以及时间计数器，它们共同组成了FAST的时间/频率系统（图1）。



图1 FAST时频系统

Fig. 1 Time/frequency system of FAST

FAST的数据采集使用的是基于由美国CASPER（Collaboration for Astronomy Signal Processing and Electronics Research）开发的ROACH2（Reconfigurable Open Architecture Computing Hardware）数字后端（图2），可以单通道输出16 Gbps的数据。对于FAST目前的观测频率（低于3 GHz），不需要变频，光电转换后就可以直接采样输出VDIF（VLBI Data Interchange Formnat）格式数据。单通道数据率可以达到16 Gbps，与最新的数据存储系统Mark6匹配。



图 2 FAST数据采集终端ROACH2
Fig. 2 Terminal of FAST: ROACH2

Mark6是由Haystack天文台开发的最新一代VLBI数据存储系统(图3),具有高速数据记录、系统开源、兼容性好的优点,未来还能支持实时甚长基线干涉(eVLBI)的观测。FAST的这套Mark6系统有4个磁盘阵列,每个阵列由8块专用硬盘组成,共有256 TB的存储空间,可以支持超过130 h的基带数据记录。

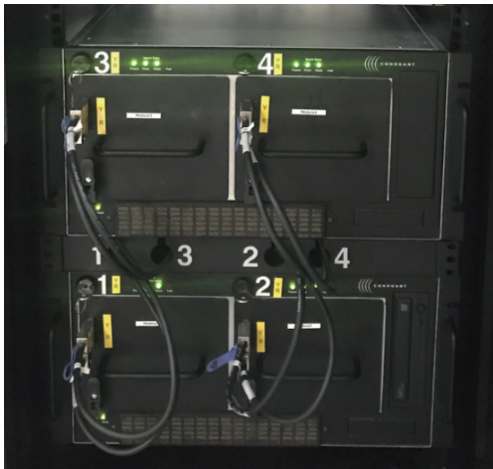


图 3 FAST数据存储系统Mark6
Fig. 3 Data recording system of FAST, Mark6

2.2 FAST VLBI观测实验

在FAST调试期间,做过多次VLBI干涉实验。首次干涉实验在FAST与北京国家天文台楼顶的4.5 m天线之间展开。FAST当时使用的是19波束接收机、ROACH2数字终端、氢钟和GPS,4.5 m天线使用的是L波段接收机、ROACH2终端、铷钟和GPS,观测数据以基带数据的形式存在电脑硬盘上。受4.5 m灵敏度的限制,选择了亚星105E作为观测源。通过对两组基带数据的相关分析,成功获得了相干条纹和时间延迟(图4)。通过两组数据错开的通道数,可推算时间延迟约3.4 ms。

为了更严格地验证FAST VLBI系统的性能,2019年1月,第二次干涉实验在FAST与上海天马65 m望远镜之间展开。最终在2019年1月24日,得到

FAST与天马65 m望远镜的首次VLBI条纹(图5),这是FAST与成熟射电望远镜之前的首次正式VLBI条纹,标志着FAST具有参加VLBI观测的能力。

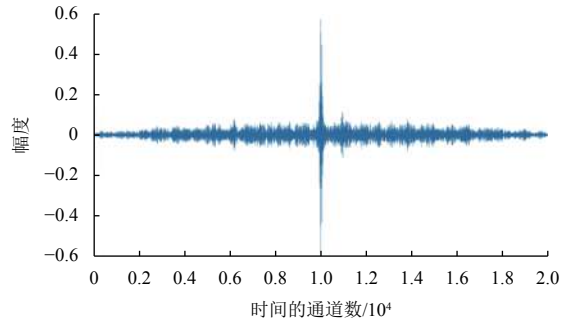


图 4 FAST与北京4.5 m望远镜数据相关结果
Fig. 4 Fringe between FAST and a 4.5 m antenna in Beijing

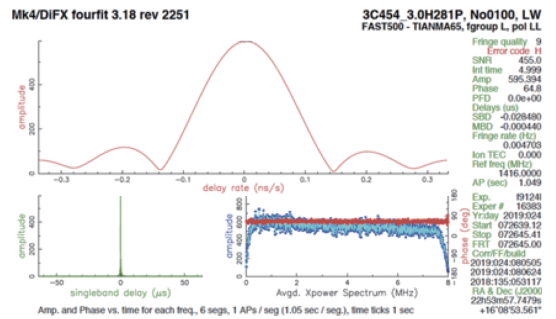


图 5 FAST与天马望远镜VLBI条纹
Fig. 5 The first VLBI fringe between FAST and Tianma telescope

未来还将和更多的射电天文台站进行VLBI干涉实验,进一步完善FAST VLBI系统的性能。

2.3 FAST VLBI研究课题

前面介绍了世界上最大的几台射电望远镜Arecibo、GBT和Effelsberg 100 m的一些VLBI研究成果,而FAST作为世界上最大的单口径射电望远镜,可以对VLBI观测网的灵敏度带来显著提升。根据文献[16],现有EVN的灵敏度约为HSA的三分之一,若FAST加入后,EVN的图像灵敏度将从16.4 μJy/beam提升至4.5 μJy/beam,优于HSA(包含Effelsberg)的4.7 μJy/beam。基于FAST高灵敏度的特点,挑选出适合FAST未来参与的VLBI研究课题。

1) 系外恒星系统的成图

通过组成类似HSA的高灵敏度VLBI阵,解构系外热辐射源的射电精细结构,对恒星的形成和演化进行研究^[1]。

2) 空间VLBI活动星系核巡天

与RadioAstron组成的空间-地面VLBI观测网将拥有最高的角分辨率,其18 cm和92 cm的工作频率也在

FAST的频率覆盖内, 利用FAST在灵敏度的优势, 对活动星系核射电喷流的内部结构和外部星系介质的性质, 以及核区的大小进行测量。

3) 伽玛暴余晖的演化

伽玛暴爆发后会有余晖现象, 并在射电波段有辐射。FAST加入类似HSA的高灵敏度VLBI观测网, 可以观测到更短标内余晖的变化情况。

4) 河外OH超脉泽

OH超脉泽来源于恒星形成区周围或者星系核周围吸积盘, VLBI高分辨观测有助于研究活动星系核(Active Galactic Nucleus, AGN)周围的物质结构和动力学, 反演星系合并历史^[31]。

5) 活动星系核和星爆星系中的HI吸收线

星系际物质为活动星系核和星爆星系提供物质和物理条件, 其成分构成和动力学需要VLBI高分辨观测。HI发射线量温度较低(约100 K), 不适合长基线高分辨率观测, 对于小于1角秒的精细结构需要依赖HI吸收线的VLBI观测^[31]。

6) 对脉冲星进行多历元的天体测量, 获得脉冲星位置、距离、径向速度等的高精度测量。这种不依赖模型的测量方法将有助于改进银河系电子密度模型, 也为研究脉冲星本身提供高精度信息, 未来可在脉冲星导航等方面有应用^[31]。

2.4 FAST VLBI规划

2.4.1 FAST VLBI系统的完善

FAST已经得到首条干涉条纹, 但若要参加标准的VLBI观测, 还需要对VLBI系统进行完善。

首先需要一套运行观测系统, 能够监测和控制VLBI系统的运行, 执行VLBI观测计划。目前FAST团队正在开发一套适配FAST的运行控制系统, 连接数字终端和Mark6, 控制VLBI观测。

其次, FAST还需要与更多的台站进行VLBI干涉实验, 进一步检验VLBI观测系统的可靠性、更精确的台站坐标等信息, 也将进一步提升FAST VLBI的观测能力。

为了方便VLBI观测实验, 需要安装一套相关处理机, 得到时间延迟等信息。FAST现场也将安装一套软件相关处理机DiFX, VLBI观测数据可以直接在FAST现场进行相关处理。

2.4.2 相位参考技术

相位参考技术是通过在校准源与目标源之间的切换观测, 将相位校准源的时延等参数应用到目标源上, 通过提高积分时间, 实现对暗弱目标源的VLBI观测。目前大部分对暗弱源的VLBI观测都需要运用相位

参考技术。

实现校准源与目标源的来回切换, 对望远镜的换源速度有要求, 换源速度太慢将影响观测效率。目前对于FAST, 5°范围内换源需要大概5 min, 1°范围内的换源大约需要1 min。采用和Arecibo类似的策略, 推荐1°范围内的相位参考, 将是实现FAST相位参考观测最简单的方式。

另外, 建设一台小口径的天线只对准参考源, 而FAST只对准目标源, 也可以实现相位参考观测。这种观测模式, 对目标源参考源的距离没有限制, FAST的观测效率也能明显提高。

2.4.3 FAST加入VLBI观测网

FAST以其灵敏度高的特点, 可以明显提升VLBI观测网的灵敏度。如图6所示, 对于一个2.5 h的EVN观测来说, FAST只需参与80 min就能将EVN的灵敏度提升一倍。而FAST能否参加现有VLBI观测网, 受到站址、望远镜观测天区的限制。如对于美国的VLBA或HSA来说, 由于台站位置原因, 有效基线数目和长度随着源的赤纬增加(图8), 对于赤纬小于40°的目标源, 大部分天线与FAST不能形成较长的有效基线(图7, 8)。对EVN、中国VLBI网(CVN)、东亚VLBI网(EAVN)来说, FAST可以贡献高灵敏的长基线。另外, 对于澳大利亚的长基线阵(Long Baseline Array, LBA), FAST可以贡献南北方向的高灵敏基线, 有利于高分辨率成图的准确性(图9)。

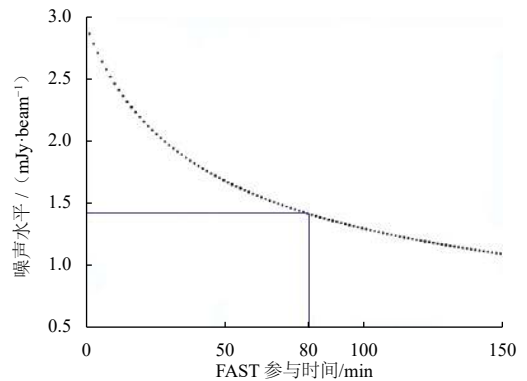


图6 2.5 h EVN灵敏度随着FAST参与时间的变化
Fig. 6 Sensitivity of a 2.5 h EVN observation improves with the time that FAST contributes

由于FAST目前主要装备3 GHz以下频率的接收机(表1), VLBI观测网的观测频率是另一个限制因素。像KVN的观测频率大于20 GHz, 而EVN、LBA、VLBA都具备1.6 GHz的观测能力, 另外天马望远镜、南山望远镜、洛南40 m望远镜也配有L波段的接收机, 可以与FAST组成L波段CVN观测网。

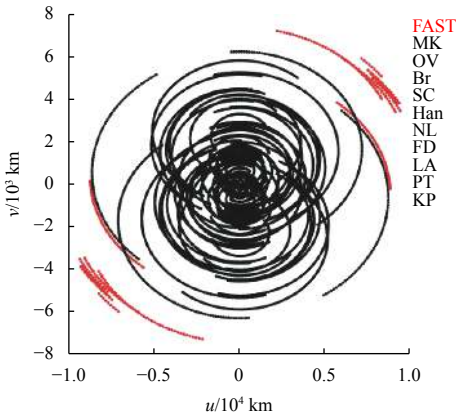


图7 FAST与VLBA对赤纬40°源的uv覆盖

Fig. 7 Uv coverage of VLBA with FAST for a source of 40 degree in declination

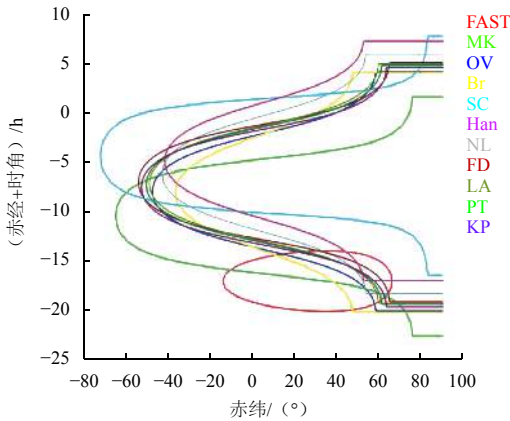


图8 FAST与VLBA台站对不同赤纬源的跟踪时间范围

Fig. 8 Tracking time between FAST and VLBA stations

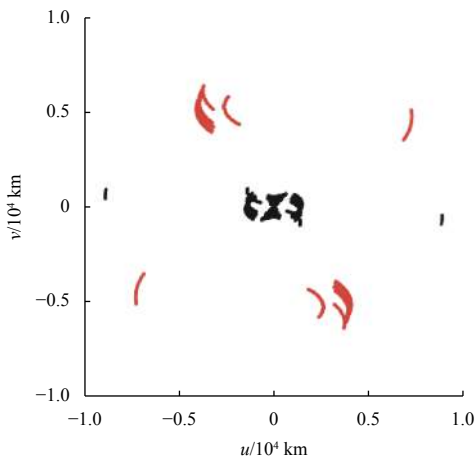


图9 FAST与LBA对赤纬30°源的uv覆盖

Fig. 9 Uv coverage of LBA with FAST for a source of 30 degree in declination

综合考虑, 根据现有VLBI观测网的状态, FAST参加CVN、EVN、LBA的VLBI观测, 将能发挥其极高灵敏度的优势。

3 结束语

本文总结了现有口径超过100 m射电望远镜参与VLBI观测和研究现状, 并详细介绍了FAST VLBI系统的各个组成。目前FAST VLBI系统已经初步建立, 并与天马望远镜产生了首条VLBI干涉条纹。结合FAST特性, 还讨论了适合FAST参与的VLBI研究课题和VLBI观测网, 并对FAST参与相位参考模式观测进行了讨论, 选择较近的参考源或者建设一台小口径天线将能提高FAST参与VLBI观测的效率。

参 考 文 献

- [1] NAN R, DI L, JIN C J, et al. The Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) project[J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2011, 20: 989-1024.
- [2] LI D, WANG P, QIAN L, et al. FAST in space: considerations for a multibeam, multipurpose survey using China's 500-m Aperture Spherical Radio Telescope (FAST)[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2019, 3: 112-121.
- [3] JIANG P, YUE Y L, GAN H Q. Commissioning progress of the FAST[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62(5): 959502.
- [4] LU J G, LEE K J, XU R X. Advancing pulsar science with the FAST[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 63(2): 229531.
- [5] DI L, ZHANG X X, QIAN L, et al. FAST detects multiple bursts in L-band from FRB 121102[Z]. [S.l.]: *Astronomer's Telegram*, 2019.
- [6] QIAN L, PAN Z C, LI D, et al. The first pulsar discovered by FAST[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62(5): 959508.
- [7] 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): 959507.
- [8] LU J G, PENG B, XU R X, et al. The radiation structure of PSR B2016+28 observed with FAST[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62(5): 959505.
- [9] YU Y Z, PENG B, LIU K, et al. FAST ultra-wideband observation of abnormal emission-shift events of PSR B0919+06[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62(5): 959504.
- [10] LU J G, PENG B, LIU K, et al. Study of three rotating radio transients with FAST[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62(5): 959503.
- [11] JIANG P, PENG B, LI D, et al. The science and technology of FAST[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62(5): 959501.
- [12] ZHANG L, LI D, HOBBS G, et al. PSR J1926-0652: a pulsar with interesting emission properties discovered at FAST[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 877: 1.
- [13] HOBBS G, DAI S, MANCHESTER R, et al. The role of FAST in pulsar timing arrays[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(2): 20.
- [14] WANG H G, QIAO G J, DU Y J, et al. How can FAST improve study of the pulsar emission mechanism and magnetospheric dynamics[J].

- Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(2): 021.
- [15] ZHANG J S, LI D, WANG J Z, et al. The potential of FAST in detecting celestial hydroxyl masers and related science topics[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(2): 022.
- [16] ZARKA P, LI D, GRIEBMEIER J, et al. Detecting exoplanets with FAST[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(2): 023.
- [17] MELIS C, REID M J, MIODUSZEWSKI A J, et al. A VLBI resolution of the Pleiades distance controversy[J]. *Science*, 2014, 345: 1029-1032.
- [18] ANDRIANOV A S, SMIRNOVA T V, POPOV M V, et al. RadioAstron studies of the nearby turbulent interstellar plasma with the longest space-ground interferometer baseline[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 786: 115.
- [19] KOVALEV Y Y, KARDASHE V S, KELLERMANN K I, et al. RadioAstron observations of the quasar 3C273[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 820: 9.
- [20] DEANE R P, PARAGI Z, JARVIS M., et al A close-pair binary in a distant triple supermassive black hole system[J]. *Nature*, 2014, 511: 57-60.
- [21] KOVALOV Y. Early results of AGN studies with the space VLB interferometer RadioAstron[C] //IAU Issue S304. [S. l.]: AAS, 2014.
- [22] BOWER G, BOLATTO A, FORD E., et al Radio interferometric planet search[J]. *The Astrophysical Journal*, 2009, 701: 1922.
- [23] KUO C, BRAATZ J, REID M, et al. The megamaser cosmology project[J]. AAS Meeting, 2009, 214: 413.05.
- [24] SNELLEN I A, SCHILIZZI R T, VAN LANGEVELDE H J, et al. Evidence for self-similar evolution of gigahertz-peaked-spectrum sources[C] //IAU Colloquium 164, 1998, Radio Emission from Galactic and Extragalactic Compact Sources ASP Conference Series. [S. l.]: IAU, 1998.
- [25] OWISANIK I, CONWAY J E. First detection of hotspot advance in a Compact Symmetric Object[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 1998, 337: 69-79.
- [26] GIOVANNINI G, FERETTI L, TORDI M, et al. EVN observations of GRS 1915+105[J]. *Astrophysics and Space Science Supplement*, 2001, 552: 508-526.
- [27] MINIER V, BOOTH R S, CONWAY J E. VLBI observations of 6.7 and 12.2 GHz methanol masers toward high mass star-forming regions[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2000, 362: 1093-1108.
- [28] PORCAS R W, PATNAIK A R. Multi-frequency VLBI observations of the gravitational lens B0218+357[C]//Extragalactic Radio Sources. New Mexico: IAU, 1996
- [29] XU Y, LI J J, REID M J, et al. On the nature of the local spiral arm of the Milky Way[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, 769: 15.
- [30] HACHISUKA K, CHOI Y K, REID M J, et al. Parallaxes of star-forming regions in the outer spiral arm of the Milky Way[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 800: 1.
- [31] 张波. FAST的VLBI观测和科学[J]. *中国科学: 物理学力学天文学*, 2017, 47(6): 7-16.
- ZHANG B. FAST VLBI observation and science[J]. *Science China-Physics, Mechanics & Astronomy*, 2017, 47(6): 7-16.

作者简介:

陈如荣(1983-), 男, 博士, 助理研究员。主要研究方向: 星系团、活动星系核、中性氢、VLBI。

通讯地址: 北京市大屯路甲20号国家天文台(100101)

电话: (010)68768614

E-mail: chenrr@bao.ac.cn

张海燕(1973-), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: VLBI, 星系研究。

通讯地址: 北京市大屯路甲20号国家天文台(100101)

E-mail: hyzhang@bao.ac.cn

VLBI System and Scientific Research of FAST

CHEN Rurong^{1,2}, ZHANG Haiyan^{1,2}, JIN Chengjin^{1,2}, GAO Zhisheng^{1,2}, ZHU Yan^{1,2},
YUE Youling^{1,2}, ZHU Kai^{1,2}

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

Abstract: As the biggest single dish radio telescope in the world, FAST would significantly improve the capability of current VLBI networks below 3 GHz. There are several VLBI networks, such as CVN, EVN and LBA, are suitable for FAST to join, after considering the location of stations and frequency of receivers. FAST would mainly contribute sensitive long baselines to the current VLBI networks, which would benefit the research in need of high resolution and high sensitivity. The slewing speed of FAST is not high. In order to effectively join the phase-referencing observations, selection of nearby calibrator or a new small antenna could be the solution. Very Long Baseline Interference (VLBI) is one of the topic sciences of the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST), which would provide significant contribution to the current VLBI networks. In order to make use of the significant contribution of FAST to the VLBI observations, it is necessary to pick suitable VLBI research projects. We summarize their main VLBI projects of three mega radio telescopes with hundred-meter aperture and give some suitable VLBI projects for FAST. FAST VLBI system consists of time/frequency system, the data sampling terminal and the data reservation system, which are all state of the art. Two fringe experiments were conducted and the first VLBI fringe between FAST and Tianma telescope was introduced. Future plans, including suitable VLBI networks to join, are discussed. Six suitable VLBI research projects are selected for FAST. The first VLBI fringe was achieved between FAST and Tianma telescope. VLBI networks, such as CVN, EVN, and LBA are suitable for FAST to contribute its significant sensitivity. Nearby small antenna could help FAST to join the phase referencing observations.

Keywords: FAST; VLBI; phase referencing

Highlights:

- Components of the FAST VLBI system are introduced.
- Some suitable science topics for FAST VLBI observations are listed.
- Possible ways for FAST to join the phase referencing observations are discussed.
- The suitable VLBI networks for FAST to join are discussed.

[责任编辑：宋宏，英文审校：朱恬]