评述

FAST 的 VLBI 观测与科学

张波*

中国科学院上海天文台, 上海 200030

* 联系人, E-mail: zb@shao.ac.cn

收稿日期: 2016-07-08; 接受日期: 2016-08-30; 网络出版日期: 2016-01-24

国家自然科学基金 (编号: 11133008, U1331205, 11673051)、上海市自然科学基金 (编号: 15ZR1446900)、人社部 2015 年度留学人员科技活动启动项目、国家重点基础研究发展计划 (973 计划)、中国科学院百人计划和 FAST FELLOWSHIP 项目资助

摘要 我国 500 m 口径球面射电望远镜 (Five-Hundred-Meter Aperture Spherical Radio Telescope, FAST) 的主要科学目标之一是作为甚长基线干涉测量 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) 的主导单元, 凭借其空前的接收面积, 极大提高 VLBI 网的观测灵敏度, 从而实施对极弱射电源的高分辨率观测研究. 然而, FAST 独一无二的特性, 比如跟踪目标天体的方式以及较小的视场, 对其参与 VLBI 观测提出了新的挑战. 本文就 FAST 的 VLBI 参考点的选取和精确测定, 以及 VLBI 相位参考观测模式的实现方案进行了探讨, 并展望了 FAST 可能参与的 VLBI 研究课题.

关键词 FAST, VLBI, 射电望远镜, 天体物理, 天体测量

PACS: 95.55.Jz, 95.85.Bh, 95.75.Kk

1 引言

我国正在贵州建设的 500 m 口径球面射电望远镜 (FAST) 是世界上接收面积最大、最灵敏的单口径射电望远镜. 类似于正在运行的美国 Arecibo 305 m 口径射电望远镜, FAST 的反射面铺设在天然的喀斯特洼坑中, 馈源舱则由钢索悬挂在反射面上空. Arecibo 望远镜的馈源舱平台是由钢索固定在半空中, 通过移动馈源相对于固定平台的位置来实现对天体的跟踪. 为了改正反射面的球差, 在特制的圆顶内采用了多级反射面, 来改进对焦的精度, 这些装

置使得馈源悬挂结构的重量高达约 9×10^5 kg. Arecibo 望远镜的工程方案除了造价高昂之外, 馈源的活动范围也受到了较大的限制, 从而缩小了可观测范围. 为了克服 Arecibo 望远镜的不足, FAST 在工程上主要具有如下的技术创新: (1) 通过主动控制形成抛物面聚焦来自天空的射电信号; (2) 采用轻型钢索拖动馈源系统实现望远镜的指向和跟踪. 这使得 FAST 不需要复杂而庞大的馈源悬挂结构, 可将重量降至约 3×10^4 kg, 从而大大节省了造价. 并使得 FAST 相对于 Arecibo 望远镜的技术参数具有诸多的优势^[1](见表 1).

引用格式: 张波. FAST 的 VLBI 观测与科学. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 069501

Zhang B. FAST VLBI observation and science (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 069501, doi: 10.1360/SSPMA2016-00326

表 1 FAST 与 Arecibo 望远镜基本技术参数的比较^{1) [1]}Table 1 Parameters of Arecibo radio telescope and FAST^{1) [1]}

	Primary reflector (m)		Illuminated area (at zenith): Gregorian feeds (m ²)	Frequency range (GHz)	Sensitivity (A/T at L-Band, m ² /K)	Pointing Limits		Slew Rates (min ⁻¹)		Pointing accuracy (rms)
	Diameter of spherical cap	Radius of curvature				Zenith angle	Declination range	Azimuth	Zenith	
Arecibo	305	265	213 × 237	0.3–10	789	0°–19.7°	–1°–+38°	24°	2°.4	5''
FAST	500	300	300 × 300	0.07–3	2000	0°–40°	–14°–+66°	> 8°		8''

FAST 的主要科学目标之一是作为主导单元参与已有的甚长基线干涉测量 (VLBI) 网, 开展高分辨率的射电观测研究. 对于参与 VLBI 网的射电望远镜, 其台站参考点的位置 (或是接收机馈源相对于台站参考点的位置) 必须满足一定的精度要求. FAST 望远镜跟踪目标天体的方式不同于以往的任何射电望远镜, 对其参与 VLBI 观测提出了新的挑战. 此外, 要提升 FAST 参与 VLBI 观测的能力和应用领域, FAST 应具备 VLBI 相位参考观测模式的能力. 本文首先探讨了 FAST 参与 VLBI 观测所面临的上述问题及可能的解决方法, 然后展望了 FAST 可参与的早期 (观测频率小于 3 GHz) VLBI 观测课题.

2 FAST 的 VLBI 观测挑战

2.1 FAST 的 VLBI 参考点

VLBI 属于射电干涉仪, 其基本观测量是各条基线干涉条纹的相位和振幅. 组成基线的两台站的位置误差将直接影响相位的精确测量. 相位的误差会造成一定的相干损失, 例如, 相位均方差为 1 rad 时, 相干性为 0.6. 因而, 对于射电源成图的天体物理研究, 要求基线误差引起的相位变化在特定的时间尺度内要小于 1 rad. 例如, 以校准源来改正该相位误差, 若时间尺度为 10 min 时, 基线长度精度要求高于 4 倍的观测波长, 且时间尺度越短要求越高^[2]. 然而, 对于高精度的 VLBI 天体测量, 则需要更高的精度, 因为台站的位置精度将直接影响射电源位置的精确测量. 因而, 选取 VLBI 天线的参考点并精确测量其位置, 是成功实施 VLBI 观测的前提.

传统的 VLBI 射电望远镜是通过绕两个轴的旋转来实现对目标天体的跟踪, 其中一个轴相对于地表固定不动, 称为第一轴, 第二轴则与第一轴垂直, 且绕第一轴旋转. 如图 1 所示, 为地平式安装的射电望远镜的几何示意图. 其中 EB 为垂直于地方水平面的方位轴, 点 A 为水平面内的俯仰轴的末端, AD 为垂直于俯仰轴的望远镜指向轴, 与目标源的方向矢量 δ 平行. P 为参考点, 为俯仰轴所在平面与方位轴 EB 的交点. 信号的波前首先到达馈源处 D 点, 然后到达 A 点, 再到 P 点. 假设方位轴与俯仰轴完全相交, 即 A 点和 P 点重合, 则无论天线指向何方, 信号到达馈源和参考点的延迟均为 DA 的距离, 即为常数. 这个常数的延迟与仪器延迟类似, 都不依赖于天线的指向, 在实际的数据处理中可被钟差项吸收. 然而, 由于实际情况下, 俯仰轴与水平轴并不相交, 而是有一定距离 AP , 称之为轴线偏差. 这使得由轴线偏差引起的信号到达 A 和 P 的延迟是随天线指向变化的量. 然而, 这个变化量可以通过源的方位矢量、轴线偏差以及方位轴的方位矢量来模型化^[3]. 类似地, 其他装载方式的望远镜, 如赤道式、 X - Y 式^[4], 尽管两个轴安装的方位不同, 但总体来说也是两个相互垂直的轴, 且其中一个是相对地面固定不动. 理论上, VLBI 参考点的选取是任意的, 只要能够得到信号到达馈源和参考点之间的延迟的变化量即可. 当然, 这个延迟量为常数最好, 但是实际上难以做到这一点, 则要求该变化量可以被简单地模型化. 为了定义和数据处理的方便, VLBI 的参考点通常是选取在固定不动的轴与包含另一轴且垂直不动轴的平面的交点. 这种选取参考点方法的优势是可以通过 VLBI 测地观测量直接求解参考点的位置.

1) <http://www.naic.edu/astro/guide/guide.pdf>

图1 VLBI 天线几何 [3]

Figure 1 VLBI antenna geometry [3].

图2为Arecibo馈源跟踪系统示意图. 该望远镜虽然没有实体的旋转轴, 但其指向也是通过方位和俯仰的变化来实现. 如图所示, 弓形滑轨在方位环架上旋转, 可实现 0° – 360° 的方位跟踪, 因而方位轴可认为是过方位环架圆心的垂线; 俯仰的跟踪则通过馈源在弓形滑轨上的滑动来实现, 因而俯仰轴可认为是弓形滑轨所对应的圆心并与水平轴垂直的水平线.

与Arecibo类似, FAST也没有实体的旋转轴来实现对天体的跟踪. 然而, 不同的是FAST没有刚性的方位环架和俯仰滑轨, 其馈源的移动是通过钢索拉动馈源平台并通过馈源舱内的二次调整装置来精确定位. 如图3所示^[5], FAST跟踪天体时, 馈源沿着焦面移动, 主动反射面实时调整使得射电信号能聚焦在馈源处. 焦面与反射面是共球心 O 的两个球冠, 理论上无论望远镜指向何方, 信号到达馈源以及球心 O 点的延迟都为常数, 因此可以通过测地VLBI观测求解 O 点位置, 而不需要借助其他额外的测量手段. 与其他VLBI射电望远镜参考点不同的是, O 点与地面没有刚性的物理连接, 因而其位置的变化不能反映FAST台站的运动. 此外, 利用VLBI观测求解 O 点位置时, 除了受到与常规测地VLBI误差源相似的影响之外, 还将受到馈源偏离理想焦面的影响. 再者, 传播介质(中性大气以及电离层)引起的VLBI延迟与高度角有关, 为了区分传播介质的延迟与仪器延迟(比如钟差), 需要通过观测较大范围的高度角. 由于FAST的观测高度角只能在 50° 以上, 将难以有效地区分两者, 而给参考点的测定带来一定的不确定性.

图2 (网络版彩图)Arecibo 305 m 望远镜馈源跟踪系统

Figure 2 (Color online) Arecibo 305 m telescope feed moving system.

图3 (网络版彩图)FAST 几何光路图 [5]

Figure 3 (Color online) FAST optical geometry [5].

FAST的VLBI参考点另外一个选择是固连在地表上且可方便观测馈源的某点 O , 通过其他测量手段实时监测馈源到该点的位置变化. 在观测数据相关处理之前, 预先计算各观测时刻信号到达馈源和参考点的延迟. FAST在观测时, 馈源随着跟踪观测目标而运动, 必须通过专门的测量系统实现馈源的实时高精度定姿定位. FAST在洼地周边山峰建造6座百余米高的支撑塔, 安装公里尺度的钢索柔性支撑体系及其导索、卷索机构, 以实现馈源舱的一级空间位置调整. 馈源舱尺度约15 m, 内装 AB 轴转向机构和并联机器人用于二级调整, 实现馈源好于

10 mm 空间定位精度^[5]. 具体而言, FAST 的焦距约为 138 m, 指向精度要求为 8", 因而馈源的位置精度要求为 5 mm. 实施馈源实时高精度定姿定位的手段, 主要包括如差分 GPS (Global Position System)^[6-9]、光学 CCD 摄影^[10,11], 以及高精度全自动全站仪^[12-15]. 这些观测手段各有利弊, 综合不同观测技术, 有利于提高馈源的定位精度以及发现不同技术间的系统差. 利用馈源位姿测量系统可以直接获取馈源相对于与地表固连的参考点的位置变化, 则不需要考虑馈源偏离理想焦面的不确定性.

综上所述, FAST 的 VLBI 参考点若选择反射面与焦面的共同球心, 则可通过测地 VLBI 观测来解算, 缺点是参考点的位置会受到馈源运动偏离理想焦面, 以及观测高度角的限制难以区分传播介质与仪器延迟的影响. 此外, 低频的单波段测地观测电离层的影响将成为重要的误差源; 若选择与地表固连接且可以与馈源通视的某点, 则可克服这一影响, 且参考点的位置通过其他空间大地测量技术可获得较高的位置精度. 然而, 这将需要专门的测量系统来实时监测馈源相对参考点的位置变化, 并需要在相关处理时考虑不同时刻位置差所造成的信号到达馈源以及参考点的时间延迟. 实际观测时, 根据馈源位姿测量系统可以得到馈源在地固坐标系中的位置, 假设馈源在球冠状的理想焦面上运动, 由馈源的多点位置坐标可求解球心的坐标, 从而可与直接用测地 VLBI 观测解算方法相互验证. 具体而言, FAST 的 VLBI 参考点可以选择已有的观测条件良好的稳定基墩, 例如 JD24^[9], 并以此作为 GPS 长期监测的基准站, 长时间持续观测的 GPS 基准站的位置精度可好于 5 mm^[16].

2.2 FAST 的 VLBI 的相位参考观测模式

VLBI 相位参考技术是交替或同时观测目标源及其邻近 ($< 5^\circ$) 的校准源, 由校准源可以得到与台站相关的延迟、延迟率以及相位的改正, 用于校准弱标源的可见度数据. 由于校准源和目标源的观测方向接近, 两者大多的误差源 (几何、仪器、大气以及电离层引起的相位误差) 也相近, 通过相位参考技术, 可以削弱这些误差的影响^[17]. 相对于传统的自校准技术, 相位参考可将积分时间从数分钟提高到数小

时, 从而探测到更多更弱的射电源, 而且还可以测量目标源和校准源的相对位置. 因而, 相位参考极大地提升了 VLBI 的观测能力. 以美国专用的 VLBI 网 VLBA (Very Long Baseline Array) 为例, 目前已超过一半的观测时间采用了相位参考观测模式.

相位参考观测的实现方式主要有同波束^[18]、快速摆动^[19]、双波束^[20]、双天线^[21]、双天线阵^[22]以及双频率^[23,24]. 根据 FAST 现有的设计方案, 可立即实施的相位参考方式是同波束和快速摆动. 然而 FAST 有效口径为 300 m, 在 L 波段比如 1.4 GHz 时, 对应的波束大小约 2.5', 即要求目标源和校准源的角距离小于该值, 使得能满足于此条件的校准源数量较少. FAST 的多波束以及相控阵馈源系统的引进将极大提高望远镜的视场, 从而扩大其同波束方式相位参考的观测能力. 相对于 VLBI 网内的其他小天线, FAST 换源速度较慢, 而快速切换模式需要在目标源和校准源之间频繁地交替观测, 换源时间将缩短在射电源上的观测时间, 从而 FAST 灵敏度的优势将受到积分时间少的影响.

Arecibo 望远镜也有换源速度慢的问题, 为了获得足够在源上的时间, 通常建议仅选取 1° 内的校准源. Arecibo 天文台为了使得大望远镜能够更高效地使用相位参考的 VLBI 观测模式, 在其附近建了一个口径 12 m 的射电望远镜. 在相位参考时, 大望远镜一直观测目标源, 而小望远镜观测目标源附近的校准源. 由校准源和小望远镜得到的延迟和延迟率信息可用以改正大望远镜观测得到目标源的数据, 实现相位参考. 小望远镜除了可以协同大望远镜参与相位参考之外, 还可作为一个重要单元参与测地 VLBI 观测, 高精度地测量地球定向参数以及台站位移等信息, 用于大地测量以及地球物理的研究. 小望远镜的另外一个用途是可以用于求解大望远镜的 VLBI 参考点. 两个望远镜同时观测同一位置已知的致密强源, 由于两个望远镜位置接近, 可以共用相同的氢钟, 且受到的中性大气和电离层的影响相近, 其差分延迟可以消除这些传播介质的影响, 而主要反映了两个台站参考点的位置差异. 小望远镜是传统的地平式装载, 其参考点可以通过测地 VLBI 观测方式精确获得, 从而可以获得大望远镜参考点的精确位置. 该位置精度主要与时延测量精度有关, 比如 30 ps, 对

应 9 mm. 该方法与 2.1 节中提及的方法相比最大的缺点是需要额外的小望远镜, 优点是可从 VLBI 观测量中直接解算大望远镜的参考点.

我国现有的 VLBI 网, 主要用于天测与测地 (S 和 X 波段) 以及深空探测, 用于天文的成图观测其 UV 覆盖缺少短基线 (例如昆明 40 m 射电望远镜到 FAST 台址), 而 FAST 的主要时间将用于低频率单天线观测, 若能在 FAST 附近建设 12 m 级宽频段的射电望远镜用于 VLBI 观测, 除了能改善我国现有 VLBI 网用于天文成图观测以及参与常规的测地 VLBI 观测, 还能通过与 FAST 协同做相位参考观测提高 FAST 的 VLBI 观测能力. 为此, 12 m 级的天线要求观测频率为 1–15 GHz, 以涵盖 FAST 以及 VLBI2010 测地观测频率 2–14 GHz^[25]; 跟踪速率不低于方位角 6° s^{-1} , 高度角 2° s^{-1} 以满足 VLBI2010 快速跟踪的要求; 台站选址应尽可能与 FAST 近, 且视野开阔, 可观测全部的方位角并可低至高度角 5° .

3 FAST 相对于 Arecibo 的优势

相比于 Arecibo 的最低高度角 70° , FAST 为 50° , 意味着具有更广的可观测天区和更长的共视时间. FAST 所在的地理位置 (约为北纬 25.647° 东经 106.856°) 使得其向西可参与 EVN (European VLBI Network), 向东可参与 EAVN (East Asia VLBI Network). 以 Arecibo 和 FAST 都能参与的 EVN 观测为例, 设目标源的赤经为 12 h, 赤纬为 20° , 如图 4 所示, EVN 若与 Arecibo 和 FAST 联测, 则 Arecibo 无法与我国的 Shanghai, Urumqi 射电望远镜以及 FAST 共视. Arecibo 和 FAST 能参与 EVN 观测的时间分别为 2.5 和 6 h, 其中 FAST 与位于欧洲天线共视的时间约 4 h. 图 5 给出了 Arecibo 和 FAST 参与 EVN 观测对 UV 覆盖的贡献. 可以发现, 相比于 Arecibo, FAST 不仅对短基线有贡献, 对东西基线长度的贡献也明显大于 Arecibo. 需要强调的是, FAST 可观测源的赤纬范围为 -14° – $+66^\circ$, 远大于 Arecibo 的 -1° – $+38^\circ$. 表 2 给出了各 VLBI 网成图的 1σ 噪声水平, 其中观测波长 18 cm, 数据记录速率 512 Mbit s^{-1} , 积分时间 60 min. 各台站等效流量密度 (System Equivalent Flux Density,

图 4 (网络版彩图) 赤经为 12 h 赤纬为 20° 的目标源在 EVN + FAST + Arecibo 各台站上高度角随时间的变化

Figure 4 (Color online) Elevation of a source with R.A. = 12 h and Dec. = 20° at each station of EVN + FAST + Arecibo versus local sidereal time at FAST station.

图 5 (网络版彩图) 赤纬为 20° 的目标源 EVN + Arecibo(a) 和 EVN+FAST (b) 的 UV 覆盖图

Figure 5 (Color online) UV coverage of a source with Dec. = 20° observed with EVN + Arecibo (a) and EVN + FAST (b), respectively.

表 2 VLBI 网成图的灵敏度

Table 2 Image sensitivities of VLBI networks

VLBI network	Image σ ($\mu\text{Jy bm}^{-1}$)
Full HSA (Effersberg + GBT + phased VLA + Arecibo + VLBA)	4.7
USA HSA (GBT + phased VLA + Arecibo + VLBA)	5.5
EVN (including Tianma 65 m)	16.4
EVN (including Tianma 65 m) + Arecibo	6.3
EVN (including Tianma 65 m) + FAST	4.5
VLBA	70.0

SEFD) 可参考网络数据 (http://www.evlbi.org/user_guide/EVNstatus.txt), FAST 在 L 波段的 SEFD 根据表 1 的 A/T 值取 1.4 Jy. FAST 的加入显著提高了 VLBI 网的灵敏度, 这意味着 FAST 的加入将可以探测到更多更弱的射电源.

4 FAST 可能的 VLBI 科学

VLBI 可在射电波段以 mas 的角分辨率来观测天体, 这是目前其他波段难以做到的. 随着工业技术的发展, 现在的 VLBI 设备已有了很大改进. 特别是数字记录终端代替以往的模拟终端之后, 相对低廉的造价可以获取很高的数据记录速率. 这些技术加上大口径的射电望远镜, 使得 VLBI 成图的噪声水平可达到 $\mu\text{Jy bm}^{-1}$ 量级, 从而可以实施一些需要高灵敏度高分辨率的科研项目. 需要指出的是, 尽管记录带宽可以提高观测灵敏度, 但对于谱线观测仍然需要大口径的射电望远镜. 关于 FAST 的 VLBI 课题, Wu 等人 [26] 曾经做过一些展望, 本节试图主要探讨 FAST 早期 (< 3 GHz) 可能参与的 VLBI 课题.

4.1 致密弱源的统计性巡天

遥远致密射电源的辐射通常来自类星体或者星系的核, 搜寻并观测这些源对于建立和加密 VLBI 的天球参考架以及天体物理 (例如致密射电源的统计特性) 的研究都有重要意义 [27]. 致密的河外射电源在 VLBI 相位参考观测中, 可以作为校准源用以探测更暗弱的目标源, 也可以作为背景源来测量河内天

体的周年视差.

VLBI 单基线高灵敏度巡天可以快速地从大样本候选体中搜索致密弱源, 为后续的多天线多频段的 VLBI 成图观测提供重要的输入星表. Effersberg 100 m-Arecibo 305 m 曾做过类似的工作 [28], 但受制于 Arecibo 可观测范围, 仅观测了赤纬 28° – 29° 的天区. 在 L 波段, 数据记录速率为 1024 Mbit s^{-1} , 积分时间为 1 min 时, FAST 500 m 和上海 Tianma 65 m 组成的基线, 其灵敏度与 Arecibo 305 m 和 Effersberg 100 m 组成的基线相当, 均为 0.1 mJy. 然而, 可观测的天区增大至 FAST 的可观测天区.

4.2 脉冲星的射电天体测量

脉冲星若能在射电波段被探测到, 则通过多个历元的观测可以得到脉冲星的基本天体测量参数, 包括位置、自行和视差. 脉冲星的计时观测可以获得其在黄道坐标系中的位置, 而 VLBI 观测可以获得其在赤道坐标系中的位置, 因而脉冲星可以用来连接河外射电天球参考架与太阳系动力学参考架. 脉冲星的自行可以反推其在大质量星团中的诞生地. 结合视差测量, 可以得到脉冲星的距离和速度, 由此可校准银河系的电子密度分布模型. 这些天体测量参数对于研究脉冲星本身的物理属性也提供了重要的信息 [29]. 此外, 脉冲星的高精度天体测量参数在广义相对论的验证以及可能的脉冲星导航方面也有重要意义.

高灵敏度的 VLBI 会极大地促进对脉冲星的观测. 这是因为不仅大多数而且那些比较有趣的脉冲

星(比如年轻的脉冲星)都比较弱. 如第3节的讨论, FAST 的加入将极大地提高 VLBI 的观测灵敏度, 从而可以观测更多更弱的脉冲星.

脉冲星的天体测量需要通过 VLBI 相位参考的观测模式来实现, 根据第2.2节的讨论, FAST 若能实现相位参考, 将极大提高脉冲星天体测量的观测效率. 影响 VLBI 相位参考天体测量精度的误差源主要包括两个部分: 热噪声引起的随机误差 — 与成图的动态范围成反比; 未补偿的中性大气以及电离层引起的系统误差 — 近似与校准源与目标源的角距成正比^[30]. 以 L 波段为例, 要获得高于 $20 \mu\text{as}$ 的天体测量精度, 成图动态范围需要达到 100. 采用数据记录速率 512 Mbit s^{-1} , 要以动态范围为 100 来探测到流量 4.5 mJy 的脉冲星, 对于 EVN+FAST 仅需要 36 sec, 而换成 VLBA 则需要近 2.4 h.

4.3 河外 OH 超脉泽

OH 超脉泽辐射来自星系核附近的星际物质或是恒星形成核区周围的分子环内, 因而可作为研究活动星系, 比如超亮红外星系 (Ultraluminous Infrared Galaxies, ULIRG) 中恒星形成的探针、示踪活动的恒星形成核以及由超新星及其遗迹导致的激波区域. 大多数 ULIRG 的能量源自星爆, 但也有部分是源自活动星系核 (Active Galactic Nucleus, AGN) 周围的恒星形成. VLBI 提供的高分辨率观测, 有助于研究 AGN 周围的分子结构及其运动学^[31]. ULIRGs 及其红移可反演星系并合的历史. 目前, 对于高红移 OH 脉泽的搜寻以及深度成图主要受到 VLBI 灵敏度的限制, 而 FAST 的加入可以极大地增加灵敏度.

以 EVN+TM65+FAST 为例, 2 MHz 的带宽分为 512 个通道, 在 L 波段, 1 h 的积分时间, 各通道成图的灵敏度可达 0.8 mJy bm^{-1} , 可以探测到亮度为 10 mJy bm^{-1} 量级的 OH 超脉泽.

4.4 AGN 和 SBN 中 OH 和 HI 吸收线

大多数星爆星系无论高红移还是低红移, 都与星系之间的相互作用或是并合有关联^[32], 这些相互作用提供了星爆所需要的气体物质和物理条件. 然而这些气体物质具体的运动学和构成需要高分辨率的

观测. 探寻星爆星系内冷的中性以及分子气体目前可以通过探测射电波段的脉泽发射和谱线吸收 (例如 HI 和 OH). 而对于谱线发射, 比如 21 cm 的 HI 谱线由于亮温度仅有约 100 K , 以目前的射电观测设备的灵敏度, 难以获得高于几个角秒的分辨率. 因而, 只有 VLBI 观测 HI 的吸收线才可能获取河外 HI 气体小于 100 mas 尺度的精细结构.

在射电活动星系核区 (AGN) 和有较强射电核的星爆核 (Starburst Nuclei, SBN) 的中央区域, 可以探测到 HI 和 OH 的吸收线. 目前已经有多个射电星系探测到宽的 ($\sim 1000 \text{ km s}^{-1}$)、蓝移的, 且非常浅的吸收系统^[33]. OH 和 HI 吸收线翼的截断速度与核区活动的强度指标 L_{FIR} 存在一定关系, 然而在 AGN 中的宽的蓝移吸收并不如此, 这可能与喷流以及星际介质的相互作用有关. 这种外流的特征也很可能是 AGN 和 SBN 活动的反馈所造成, 而反馈在星系演化中扮演很重要的角色. 宽的带宽加上大视场, 在 AGN 和 SBN 中搜寻 HI 和 OH 的吸收线, 可进行 SBN 和 AGN 的类型与红移关系的统计研究, 从而可以探讨是否核周气体随红移变化.

若采取以往对 NGC 3079 中 OH 吸收线的 VLBI 观测^[34] 相同的观测模式, 通道带宽 62.5 kHz , EVN+TM65+FAST 仅需要 1 h 的积分时间, 即可达到成图灵敏度 0.2 mJy bm^{-1} .

4.5 星爆星系中的超新星遗迹

目前的观测仍然主要集中于近邻的星爆星系, 对星爆星系内大质量恒星形成的详细过程仍然了解很少. 因此有必要研究更暗弱的更遥远的星爆星系. 这些高红移的星爆星系要求更高灵敏度和更高分辨率的 VLBI 成图观测. 例如, 少数几颗超新星其诞生时已经做了成图观测, 但是其演化到遗迹的这一过程的监测需要高灵敏度的 VLBI 观测^[35]. 对于超新星遗迹 (Supernova Remnant, SNR), 高保真的成图有助于从延展的射电信号中提取弱的超新星遗迹. 高的角分辨率和多频率的 VLBI 观测可提供必要的结构和谱指数信息用以区分弱的超新星遗迹和 HII 区. 此外, 在星爆星系中还存在某些特殊的射电源, 它们与传统的超新星遗迹具有典型的壳状和部分壳状的

结构不一致, 而是非常致密, 很有可能是伽玛爆的余晖^[36]. 高分辨率和高灵敏度的成图有望验证这一假设. EVN+TM65+FAST 可在 L 和 S 波段对 1 mJy 的 SNR 进行观测, 以 512 Mbit s^{-1} 的记录速率, 1 h 的积分时间可在 L 波段达到动态范围高于 200.

4.6 引力透镜

引力透镜现象可以用来一次性测量 H_0 ^[37,38], 避免传统距离阶梯法所带来的误差传递, 也为从宇宙微波背景 (Cosmic Microwave Background, CMB) 测量获取宇宙学参数提供重要的输入信息. 除此之外, 引力透镜效应亦可用于确定高红移星系准确的质量分布信息, 用于研究高红移星系的结构和演化. 相比于在光学波段仅能观测比较亮的星系, 且受制于尘埃消光的影响, 射电波段的成图观测联合透镜的物质分布模型是研究星系的物质分布信息的重要手段^[39]. 引力透镜延展的源为研究透镜质量分布模型提供最佳

的约束, 而 VLBI 的观测可以分解致密的射电源. 由于这些源通常都是陡谱源, 因此在低频波段来观测将提供非常重要的信息. 引力透镜系统的射电流量可弱至 1 mJy, 类似第 4.5 节的观测设置, 在 L 波段, EVN+TM65+FAST 仅需要 1 h 的积分时间即可获得动态范围高于 200 的成图.

5 结束语

FAST 的主要科学目标之一是作为主要单元参与 VLBI 观测, 能以极高的分辨率探测以往难以观测的弱源, 从而在天体测量以及天体物理研究的各领域发挥重要作用. FAST 与众不同的结构设计, 使得其在参与 VLBI 观测时, 在参考点的选取以及相位参考观测模式的实现方式上需要有特别的考虑. VLBI 功能的实现, 是 FAST 主导低频 VLBI 观测实现其主要科学目标的前提.

致谢 感谢审稿人对本文提出的细致中肯的修改建议. 感谢南京大学郑兴武教授、上海天文台钱志瀚研究员、国家天文台南仁东研究员以及其他国内外同行的热心帮助.

参考文献

- Nan R, Li D, Jin C, et al. The five-hundred aperture spherical radio telescope (fast) project. *Int J Mod Phys D*, 2011, 20: 989–1024
- Fomalont E B, Perley R A. Calibration and editing. *ASP Conf Ser*, 1999, 180: 79–110
- Sovers O J, Jacobs C S. Observation Model and Parameter Partials for the JPL VLBI Parameter Estimation Software MODEST 1994. Technical Report, Jet Propulsion Lab, 1994
- Nothnagel A. Conventions on thermal expansion modelling of radio telescopes for geodetic and astrometric VLBI. *J Geodesy*, 2009, 83: 787–792
- Nan R D, Li H X. Progress of FAST in science technique and instrument (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 1063–1074 [南仁东, 李会贤. FAST 的进展 —— 科学、技术与设备. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014, 44: 1063–1074]
- Xie B F, Yu M, Bai T, et al. Automatic GPS-based surveying and control system for FAST radio telescope (in Chinese). *J Tsinghua Univ (Sci Tech)*, 2004, 44: 379–382 [谢炳福, 余明, 白涛, 等. 基于 GPS 的 FAST 望远镜馈源平台自动测量控制系统. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2004, 44: 379–382]
- Ren H F. Research on the Inspection and the Application of GPS Kinematic Surveying Technology in the Project of FAST. Dissertation for Master Degree. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2008 [任红飞. GPS 动态测量技术的检测及其在 FAST 工程中的应用研究. 硕士学位论文. 郑州: 解放军信息工程大学, 2008]
- Zhan Y H, Zheng Y, Zhang C, et al. Application of GPS-RTK in tracking feed system of FAST (in Chinese). *Bull Surv Mapping*, 2013, S1: 29–33 [詹银虎, 郑勇, 张超, 等. GNSS-RTK 技术在 FAST 馈源舱测量中的可行性研究. *测绘通报*, 2013, S1: 29–33]
- Song B N. Research on the Application of GPS-RTK in Coarse-Adjusting Measurement of Feed Support System of FAST. Dissertation for Master Degree. Guiyang: Guizhou University, 2015 [宋本宁. GPS-RTK 在 FAST 馈源一次支撑测量中的应用研究. 硕士学位论文. 贵阳: 贵州大学, 2015]
- Qin Z J, Wang G Z, Luo W B, et al. Light-spot positioning system with large viewing field and high precision (in Chinese). *J Tsinghua Univ (Sci Tech)*, 2002, 42: 39–42 [秦志军, 王广志, 骆文博, 等. 基于线阵 CCD 的大视场高精度三维实时定位系统. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2002, 42: 39–42]

- 11 Wang C S, Ni B. Positioning and tracking of feed cabin of FAST (in Chinese). *Appl Electron Tech*, 2004, 30: 14–16 [王从思, 倪蓓. FAST 馈源舱的静态定标和动态跟踪. *电子技术应用*, 2004, 30: 14–16]
- 12 Wang W L, Duan B Y, Peng B, et al. Computer vision-based real-time positioning system for feedback source cabin of large radio telescope (in Chinese). *Optical Tech*, 2001, 27: 78–81 [王文利, 段宝岩, 彭勃, 等. 基于计算机视觉的大射电望远镜馈源舱动态定位系统. *光学技术*, 2001, 27: 78–81]
- 13 Luo Y B. Research on the application of survey robot in tracking survey of the feed supporting system of FAST. Dissertation for Mast Degree. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2003 [骆亚波. 测量机器人在 FAST 馈源动态跟踪测量中的应用. 硕士学位论文. 郑州: 中国人民解放军信息工程大学, 2003]
- 14 Liu D F. Study of the key measure technology for the large radio telescope. Dissertation for Master Degree. Xian: Xidian University, 2007 [刘东峰. 大射电望远镜测量关键技术研究. 硕士学位论文. 西安: 西安电子科技大学, 2007]
- 15 Tai Y. Research on precision measurement technology for the large radio telescope. Dissertation for Master Degree. Xian: Xidian University, 2009 [郇瑜. 大射电望远镜精密测量技术研究. 硕士学位论文. 西安: 西安电子科技大学, 2009]
- 16 Dong D, Fang P, Bock Y, et al. Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series. *J Geophys Res (Solid Earth)*, 2002, 107: 2075
- 17 Beasley A J, Conway J E. VLBI phase-referencing. *ASP Conf Ser*, 1995, 82: 327–343
- 18 Marcaide J M, Shapiro I I, Cohen N L, et al. 1038+528A B-phase-reference and spectral-index maps. *VLBI Compact Radio Sour*, 1984, 110: 247
- 19 Alef W. Test of phase-reference mapping for switched observations. In: *Proceedings of the 129th IAU Symposium Cambridge*. Cambridge: The Impact of VLBI on Astrophysics and Geophysics, 1988. 523
- 20 Honma M, Fujii T, Hirota T, et al. First fringe detection with VERA's dual-beam system and its phase-referencing capability. *Publ Astron Soc Japan*, 2003, 55: L57–L60
- 21 Asaki Y, Saito M, Kawabe R, et al. Phase compensation experiments with the paired antennas method. *Radio Sci*, 1996, 31: 1615–1626
- 22 Rioja M J, Stevens E, Gurvits L, et al. Phase-referencing in “cluster-cluster” VLBI mode. *Vistas Astron*, 1997, 41: 213–217
- 23 Asaki Y, Shibata K M, Kawabe R, et al. Phase compensation experiments with the paired antennas method 2. Millimeter-wave fringe correction using centimeter-wave reference. *Radio Sci*, 1998, 33: 1297–1318
- 24 Dodson R, Rioja M J. VLBA scientific memorandum n. 31: Astrometric calibration of mm-VLBI using “source/frequency phase referenced” observations. *arXiv*: 0910.1159
- 25 Xia J C, Li J L, Han Y B. On the next generation of the VLBI system—VLBI2010 (in Chinese). *Prog GeoPhys*, 2010, 5: 1623–1627 [夏金超, 李金岭, 韩延本. 关于新一代甚长基线干涉系统 VLBI2010 计划. *地球物理学进展*, 2010, 5: 1623–1627]
- 26 Wu S, Qian S, Tian W. High-sensitivity VLBI and the project FAST. *Prog Astron*, 2001, 19: 17–26
- 27 Preston R A, Morabito D D, Williams J G, et al. A VLBI survey at 2.29 GHz. *Astron J*, 1985, 90: 1599–1641
- 28 Porcas R W, Alef W, Ghosh T, et al. Compact structure in FIRST survey sources. *arXiv*: astro-ph/0412651
- 29 Chatterjee S, Briske W F, Vlemmings W H T, et al. Precision astrometry with the very long baseline array: Parallaxes and proper motions for 14 pulsars. *Astrophys J*, 2009, 698: 250–265
- 30 Reid M J, Honma M. Microarcsecond radio astrometry. *Ann Rev Astron Astrophys*, 2014, 52: 339–372
- 31 Klöckner H R. Extragalactic Hydroxyl. Dissertation for Doctoral Degree. Groningen: University of Groningen, 2004
- 32 Sanders D B, Soifer B T, Elias J H, et al. Ultraluminous infrared galaxies and the origin of quasars. *Astrophys J*, 1988, 325: 74–91
- 33 Morganti R, Tadhunter C N, Oosterloo T A. Fast neutral outflows in powerful radio galaxies: A major source of feedback in massive galaxies. *Astron Astrophys*, 2005, 444: L9–L13
- 34 Hagiwara Y, Klöckner H R, Baan W. VLBI imaging of OH absorption: The puzzle of the nuclear region of NGC3079. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 353: 1055–1063
- 35 Martí-Vidal I, Marcaide J, Alberdi A. Structures and Expansions of SN 1993J and SN 2004et. *Lecture Notes Essays AstroPhys*, 2006, 2: 215–226
- 36 Muxlow T W B, Pedlar A, Beswick R J, et al. Is 41.95+575 in M82 actually an SNR? *Memorie Della Soc Astron Italiana*, 2005, 76: 586–588
- 37 Refsdal S. On the possibility of determining Hubble's parameter and the masses of galaxies from the gravitational lens effect. *Mon Not R Astron Soc*, 1964, 128: 307–310
- 38 Biggs A D, Browne I W A, Helbig P, et al. Time delay for the gravitational lens system B0218+357. *Mon Not R Astron Soc*, 1999, 304: 349–358
- 39 Winn J N, Rusin D, Kochanek C S. Investigation of the possible third image and mass models of the gravitational lens PMN J1632-0033. *AstroPhys J*, 2003, 587: 80–89

FAST VLBI observation and science

ZHANG Bo*

Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

One of the primary scientific goals of the world largest single-dish radio telescope — Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) is high angular resolution observations of radio sources. With its unprecedented collecting area, FAST will greatly improve the sensitivity of very long baseline interferometry (VLBI), and broaden the sciences with the capability of detecting much weaker radio sources than ever before. However, the unique designs of FAST, such as the complicate system of target tracking and very small field of view, present new challenges of VLBI observations. In this paper, we discuss the selection and position determination of the VLBI reference point, and the implement of phase-reference observing modes of FAST. Finally, some potential contributions of FAST to low frequency high-sensitivity VLBI astronomy are described.

FAST, VLBI, radio telescope, astrophysics, astrometry

PACS: 95.55.Jz, 95.85.Bh, 95.75.Kk

doi: 10.1360/SSPMA2016-00326