

高灵敏度 VLBI 和 FAST 计划

吴盛殷 钱善璿 田文武

(中国科学院北京天文台 北京 100012)

摘 要

概述了 VLBI 天体物理的近期发展、主要成就及其受到的灵敏度制约, 简要地回顾了目前还处在不太成熟阶段的低频 VLBI 的探索及近十余年中对提高 VLBI 灵敏度的硬件和软件两方面的尝试, 并在此基础上, 着重讨论了我国计划中的 FAST 射电望远镜对提高 VLBI 灵敏度的可能贡献, 展望了因为 FAST 的参与而获得的中低频高灵敏度 VLBI 的天体物理课题及其意义。

关键词 灵敏度 — VLBI 天体物理 — 球面射电望远镜 — FAST 计划

分类号 P111.44

1 概 述

随着 70 年代中期 VLBI 图像重建算法的提出和逐渐成熟、地区和全球 VLBI 网的建立以及 1992 年一个专用 VLBI 阵 — VLBA 在美国的建成和投入工作, VLBI 诞生 30 年来已经成为以极高空间分辨率研究致密射电源或活动星系核 (AGNs)、星际脉泽 (masers)、河外超脉泽 (megamasers and gigamasers)、射电星等致密天体的不可替代的观测设备。AGN 中相当普遍的核 — 喷流形态及喷流中节 (knots) 的视超光速运动的发现、喷束模型 (Beaming model) 的观测和论证、统一模式 (Unified schemes) 的探讨、脉泽亮斑的自行和银河及邻近星系距离的直接测定^[1]、通过不同红移的 AGNs 结构及其变化的测量直接检验和确定 H 及 q_0 等宇宙参数、通过对超脉泽 (megamasers) 的观测直接得到黑洞存在的证据^[2]等都是近十余年中 VLBI 在天体物理研究中的主要贡献, 此外与 IDV (Intraday Variables, 一天内变化的河外变源) 相联系的小尺度结构变化^[3]、pc 尺度喷流偏振特性和法拉第旋转的观测^[4]、BL Lac 源大样本的偏振观测^[5]、对 CSO 的结构及其二热斑膨胀 (分离) 速度的探测, 表明它们代表一类最年轻的河外射电源^[6]、 γ 射线暴激变源的结构变化^[7]等更是近几年 VLBI 天体物理的研究成果。VLBI 还在经典的天体测量、地球动力学和地球物理学等领域, 成为精度远远超过传统观测手段的“现代”观测手段。

正是由于 VLBI 近十余年的累累成果和卓越贡献,自 70 年代以来,平均每两年组织一次颇具规模的国际学术讨论会,总结和交流 VLBI 观测和研究的成果,而 VLBI 天体物理学学术会议平均每 4 年举行一次^[8]。

虽然随着毫米波 VLBI 观测的开展以及空间 VLBI 计划的实施,VLBI 的角分辨率已经达到几十 μas ,即在物理上对最近的 Seyfert 星系有约 0.001pc、对遥远类星体有约 1pc 的分辨率。但主要由于灵敏度的限制,目前用 VLBI 技术仅仅对约 600 个射电源成功地进行了成像观测^[9],其中约 300 个源得到了多历元、多频率的较详细的监测研究,而且所进行的 VLBI 观测,主要在厘米波段,因为在该波段致密核有较强的射电辐射,接收机灵敏度也较高,大气和电离层容许较长的相干积分时间。观测的对象主要是类星体及 BL Lac 天体、存在于恒星形成区及晚型星的脉泽源。VLBI 偏振观测对了解致密射电源的本质、演化、结构和磁场是十分重要的,但一般河外射电源的偏振度都小于 10%,迄今仅有约 50 余个较强的射电源得到了 VLBI 偏振图像。与在 NRAO-MPIfr 5GHz 巡天基础上得到的马普射电源表中的 1845 个 5GHz 流量大于 1Jy 的射电源相比,获得上述三类 VLBI 图像的射电源数目仅分别占 30%、15% 和 3%。银河系内天体虽然比河外射电源要近得多,但其射电发射的强度比射电星系要弱 20 多个量级,所以得到 VLBI 探测的数量更少。近年来虽然已经探测了一些活动双星^[10]、X 射线双星^[11]及超新星^[12]等特殊河内天体的致密结构及其变化,也用空间 (HALCA) 一地面 VLBI 网以更高空间分辨率观测了一些致密源的结构^[13,14],还在大样本观测的基础上进行了初步的统计研究^[15,16],研究了源的结构和流量变化的关系^[17],但是所有的观测研究都表明,目前用 VLBI 深入探测射电源的主要障碍仍是灵敏度不够。

处于预研究阶段的中国 FAST 计划拟在贵州建造一个孔径约 500m 的主动面板球面射电望远镜,因其最终将具有 200m 的最小有效孔径、大到 $50^\circ \sim 70^\circ$ 的可观测天顶角^[18]以及 0.3 ~ 6GHz (第一阶段)的工作频率,有希望在中、低频高灵敏度的 VLBI 天体物理观测研究中扮演重要角色。

2 Arecibo 球面射电望远镜和低频 VLBI

VLBI 是目前仅有能突破大气视宁度极限的高分辨率地面天文观测设备,宇宙中极端致密的射电天体或结构(包括最遥远的射电源)只能利用 VLBI 来观测。目前地面 VLBI 在毫米波、厘米波和米波段的分辨率量级分别为 0.1 mas、1 mas 和 10 mas,现有的观测表明,存在着比上述分辨率还小至少一个数量级的极致密的射电源或结构。为了追求更高的分辨率,突破地球直径的限制发展空间 VLBI 技术,向更短的波长扩展,完善毫米波 VLBI 技术,提高 VLBI 的灵敏度,成为近十年来 VLBI 技术发展的必然趋势^[8]。

在发展宽频带系统和接近量子极限的低噪音接收机的同时,大接收面积天线仍然是提高 VLBI 灵敏度的一个重要途径。美国在波多黎各建造的 Arecibo 305m 球面射电望远镜因为其最大有效孔径达 200m,所以一直被用作 VLBI 的一个单元,以提高 VLBI 的观测灵敏度,但因其最大天顶角仅及 20° ,可观测射电源的赤纬范围有限,使该射电望远镜对可观测射电源的跟踪时间也不超过 2.7h,所提供的观测结果较少。但是迄今它仍然是世

界上接收面积最大的射电望远镜, 对提高 VLBI 灵敏度的任何尝试都有很大的吸引力。例如日本的 VSOP 空间 VLBI 计划就要求 Arecibo 射电望远镜参与其 1000 次 6.5h 观测周期中的 255 次。再看目前世界上对较弱射电源的成功的 VLBI 成图观测, 均有 Effelsberg 100m、用作同相阵 (phased array) 的美国甚大阵 (VLA)、荷兰 Westbork 综合射电望远镜 (WSRT)、英国 Jodrell Bank 76m 等大口径射电望远镜参加, 即将投入工作的美国 Green Bank 100m 射电望远镜 (GBT) 也将与 VLBA 联网以增加 VLBA 的灵敏度, 说明对高灵敏度 VLBI 的需要和期望无论在地面或空间 VLBI 组网中, 都是有增无减。和 Arecibo 望远镜相比, FAST 将具有更大有效孔径和几乎可与常规抛物面望远镜相比的可观测天顶角, 预期对高灵敏度 VLBI 的观测可作出引人注目的贡献。

早在 VLBI 发展的早期, 即 60 年代中期到 70 年代中期, 就进行过多次低频 VLBI 观测的尝试, 取得了一些低频变源或有特殊低频频谱的射电源细节结构的有趣信息。80 年代中期以后, 610 和 327MHz 已经被规定为世界上许多 VLBI 网的常规工作频率, 对一些活动星系核, 特别是高红移河外源的低频和低频结合观测研究已经展开^[19]。我国上海天文台 VLBI 站与欧洲有关 VLBI 站也在 327MHz 等频段对一些活动星系核进行了成功的联测^[20]; 为准备另一个空间 VLBI 站 RADIOASTRON 的发射及其在 327MHz 的观测而进行的低频 VLBI 巡天也已经取得初步结果^[21]。但是由于电离层不规则扰动的影响, 相干积分时间较短, 可见度数据的信噪比较差, VLBI 成像观测的难度大, 研究成果相对较少, 且多限于较强的射电源。提高低频 VLBI 观测的灵敏度, 并扩大 VLBI 的基线到空间, 成为目前发展低频 VLBI 天体物理课题的关键所在。

3 高灵敏度 VLBI 网的探讨及 FAST 的可能贡献

由于 VLBI 采用彼此独立的原子钟提供本振信号, 即便观测中精确地知道了源的位置、各望远镜的地理位置、大气延迟及 UT1, 在相关流量 $S_c(u, v)$ 的测量中仍然包含了未知的和 A, B, C, \dots 各站相联系的相位项 $\phi_A, \phi_B, \phi_C, \dots$, 这些相位项的随机变化部分不能被模型化和改正, 只能让其在相干积分时间内给相关流量带来容许的损失。而相位的系统变化部分反映了本振频率的平稳漂移、各站大气的平稳变化、射电源的赤经赤纬、各站地理坐标和 UT1 的误差, 它们可以用模型拟合并得到改正, 它们也正是进行天体测量、地球自转参数测定和地球动力学研究的基础。

3.1 SFF 和 GFF

一般情况下, 独立的原子钟会引进不同的钟差, 计算的延迟并不精确, 标准的条纹拟合 (或搜寻, 即 SFF) 通过对数十个相邻时刻差为 25ns 的数据流相关, 找出使 S_c 最大的通道的办法来改正钟差, 得到延迟的一级近似和窄搜寻窗中的最佳条纹率, 但前提是在有限的相干积分时间里源的信号以一定的信噪比能在所有的基线上确定无误地检测到, 而拟合是逐条基线进行的。假设在条纹拟合中将每一基线的条纹率及延迟分为各与其一天线相关联的两个成分, 而这些以各望远镜为基础的参数, 由闭合关系加以约束。用所有基线的观测数据, 同时解出各望远镜的相关参数, 这就是总体条纹拟合 (GFF) 算法。可以用该算法来提高整个 VLBI 网的灵敏度^[22]。当然由于使用独立本振, 各站本振的基

本参数(如幅度和相位)以及各基线相关流量的绝对值,是不可能直接解出来的^[22]。

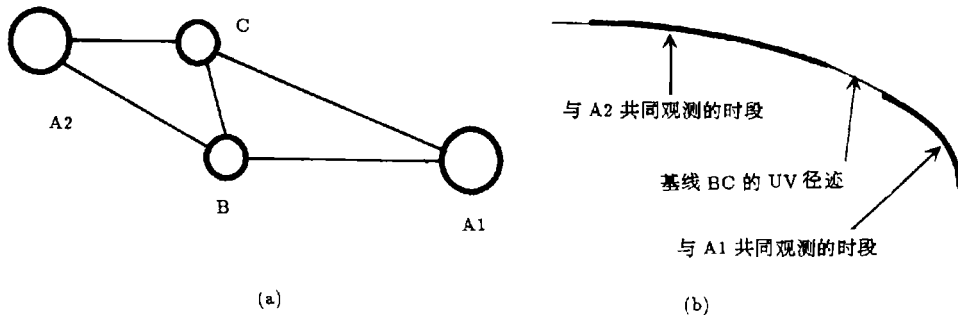


图1 (a) 全条纹拟合 (GFF) 和 (b) 跟踪接力 (TR) 概念的示意图

以如图 1(a) 的最简单情况来说明 GFF 可能带来的好处, 设有三个望远镜 A, B, C , 其中 A_1 或 A_2 代表 A , 为和 B, C 相比孔径较大者, 对一个高度致密的射电源, 它可能只在基线 AB 和 AC 检测到, 但基线 BC 上的条纹率和延迟可以通过下面的闭合关系计算出来:

$$F_{BA} + F_{BC} + F_{CA} = 0, \quad D_{AB} + D_{BC} + D_{CA} = 0 \quad (1)$$

从而该基线的相关流量 $S_c(B, C)$ 也可以借助标准的校准过程推算得到。本来闭合相位就改善了给定基线上相关流量的有噪声的估计, GFF 则进一步改善了弱条纹情况下的估计, 而且解在较长时间的平滑又降低了噪声^[23]。在三望远镜的简单情况, 源成为 VLBI 网可观测的条件不再是“有限的相干积分时间里源的信号以信噪比 5 能在所有的基线上确定无误地检测到”, 而是在含 A 的基线上信噪比为 5, 在不含 A 的基线上可以为 1, 即粗略地说, 和不含大射电望远镜的情况相比, VLBI 网的灵敏度提高了 5 倍。对有一定结构的射电源, 则需要设定模型进入拟合的迭代程序, 因此 GFF 实际上仍是一种自校准或混合成像的过程。

3.2 含 FAST 的 VLBI 网可行性的初步论证

(1) 若贵州 500m 球面射电望远镜的有效孔径是 300m, 其接收面积将 144 倍于美国 VLBA 的单元, 在含有它的一个基线上的灵敏度将比后者的一基线灵敏度高 12 倍。若 VLBI 网还包含了比如 Arecibo、德国 Effelsberg、印度 GMRT、WSRT、VLA、印度 Ooty、美国 GBT、英国 JBMkIA、澳大利亚 Parkes 等较大的望远镜, VLBI 观测灵敏度将显著提高。FAST 与日本 VSOP 的 8m 轨道望远镜的相关孔径为 49m, 而后者与 VLBA 单元的相关孔径仅为 14m, 相差 3.5 倍的孔径意味着 12 倍的灵敏度优势。关于灵敏度的计算和进一步论证这里不拟详细给出, 有兴趣的读者可参阅文献 [6、24、25、27]。

(2) 利用 CALTECH-VLBI 软件包中的 UPTIME 或 PCSCHEM 软件可以估算出对含贵州 500m 球面射电望远镜的不同 VLBI 网和射电源的共同可观测时间。事实上, 以最大可观测天顶角 60° 为例, 对中赤纬源和亚太网的共同观测时间为 8~9h, 和欧洲网大体能保证 4~5h 的共同观测。

(3) VLBI 的快拍模式 (snap-shot) 或利用多个大射电望远镜入网及不同时间段的 GFF 技术, 将有助于发挥贵州大球面射电望远镜在 VLBI 成像观测中提高灵敏度的作用。

(4) 如果在 VLBI 网 (特别是全球 VLBI 网中) 加入一个或几个大射电望远镜可以大大改善该网的观测灵敏度, 但是对 Arecibo 型球面射电望远镜来说, 有限的天顶角覆盖, 只能获得有限的 UV 径迹, 在利用 GFF 时, 也就只能求出两个较小天线的 UV 径迹上的相当小部分可见度数据, 灵敏度的改善对整个网来说将大打折扣。这时利用在全球网中的多个大天线 (如图 1-b 及图 2 所示) 进行“跟踪接力 (TR)”, 就有可能利用 GFF 于包含不同大射电望远镜的闭合三角, 求出上述径迹上的几乎全部可见度数据。当然在实际设计观测程序和申请相应的望远镜时, 考虑到不同地理位置的望远镜对同一源的观测性, 以及其容许的 VLBI 观测时间, 这种“跟踪接力”很难如设想的那么完美。

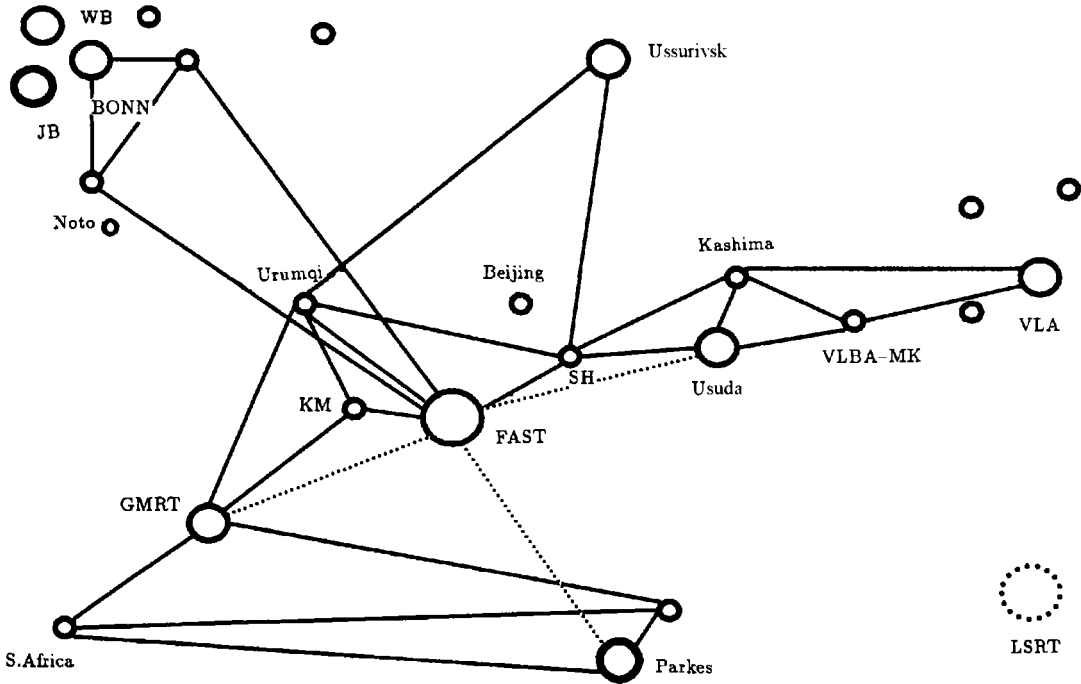


图 2 利用 GFF 和 TR 概念的、含 FAST 的可能 VLBI 网示意图

3.3 VLBI 中的自校准和噪声 [24]

实际上 VLBI 成像很少能达到热噪声所确定的灵敏度极限, 首先有限的空间频率覆盖产生的高旁瓣只能在解卷积中部分地移去, 其次在各望远镜的复增益 (特别是相位) 并不完全知道的情况下, 必须采用自校准, 但后者增加了噪声电平为: $\sigma_{\text{selfcal}} = [(N-1)/(N-3)]^{0.5} \sigma_{\text{coherence}}$, 此外, 所有非天线基础的误差源, 如相关器误差、通带失配、偏振不纯、大气的非共面性等, 均不能被自校准改正。

3.4 可能的地区 VLBI 网和全球 VLBI 网

一个可能的地区 VLBI 网由贵州 500m 球面射电望远镜 (FAST)、中国的上海、乌鲁木齐、昆明 (待完成)、密云 (待完成)、印度即将完成的大米波射电望远镜 (GMRT)、俄国的乌苏里斯克 (Ussuriysk)、日本的 Usuda、Kashima, 澳大利亚 Parkes 等射电望远镜

组成。在这样一个网中，除了有效孔径 300m 的 FAST 和 250m 的 GMRT 外，还有 3 个孔径 64~70m 的望远镜，利用它们与其他 30m 级的射电望远镜进行“跟踪接力”，可以形成一个高灵敏度的、基线长达 7000 余 km 的 VLBI 网，在观测赤纬 $N15^\circ \sim N75^\circ$ 的射电源时，可获得 7h 以上的共同观测时间，无论是连续跟踪成像观测，或是对该赤纬范围几个选源的交替“快拍”观测，都可以取得相当好的 UV 覆盖。图 2 及图 3 表示了该网的大体布局 and UV 覆盖。

0007+171

FAST SHANGHAI KUNMING MIYUN GMRT USSURISK KASHIMA PARKES URUMQI USUDA

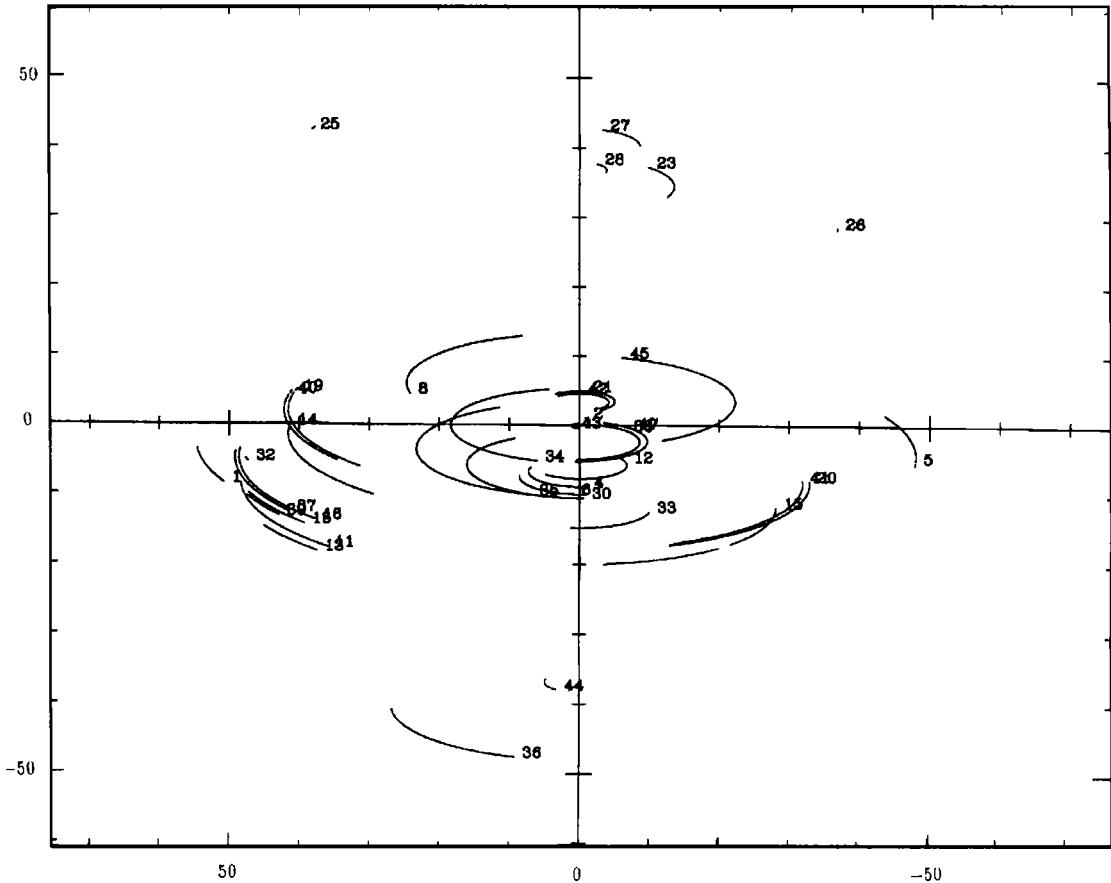


图 3 一个含 FAST 及亚、澳主要射电望远镜的 VLBI 网的 UV 覆盖
横坐标及纵坐标单位均为兆波长 (在频率 1600MHz 处), 即 $0.1875 \times 10^6 \text{m}$

另外一种可能的地区网是一个“悬臂”网，它可以仅由 FAST、上海、乌鲁木齐的 VLBI 天线和印度的 GMRT 组成，GMRT 本身是一个尺度为 100km 量级的、二维连线综合孔径阵，对射电源及其周围低亮度区有很好的成像能力，而贵州球面镜与 GMRT 各个天线组成基线为千公里量级的若干干涉仪对。这样的一个低频 VLBI 网，对观测既有高分辨率细节又有低亮度周边结构的射电源，将是相当有威力的观测设备。当然悬臂网存在动态范围低、不可信成分 (特别是 NS 方向) 较多的固有弱点，用以观测结构较复杂或

从未观测过的源时应慎重。

除了前述多天线地区网的射电望远镜外, 加上德国 Effelsberg 的 100m 等欧洲网的天线及美国 VLBA 在夏威夷 (Hawaii) 的一个站 (25m), 可以组成一个“全球” VLBI 网, 在这样的网中 FAST 与其他射电望远镜有约 4.5h 的共同观测时间, 图 4 为其一例观测的 UV 覆盖。当然和更多射电望远镜的联网也是可能的, 但 FAST 和美国的大部分望远镜仅有 2~3h 的共同观测时间, 和欧洲的大部分望远镜也只有 4~5h 的共同观测时间, 必须“跟踪接力”。作为较保守的估计, 在上述 UV 覆盖计算中, FAST 所用的最低仰角是 50° , 而不是预期可达到的 30° 乃至 20° 。

Arecibo 望远镜参与地面 VLBI 网的观测较少, 主要受限于其天空覆盖仅在天顶角 20° 以内, 而预期 FAST 的天空覆盖可与常规抛物面望远镜相比, 从而可以在未来地面高灵敏度 VLBI 观测中发挥重要作用。此外和 Arecibo 望远镜相比, FAST 在参与空间 VLBI 观测中将会发挥更重要的作用。除了更长的共同观测时间这一重要因素外, 由于 VSOP

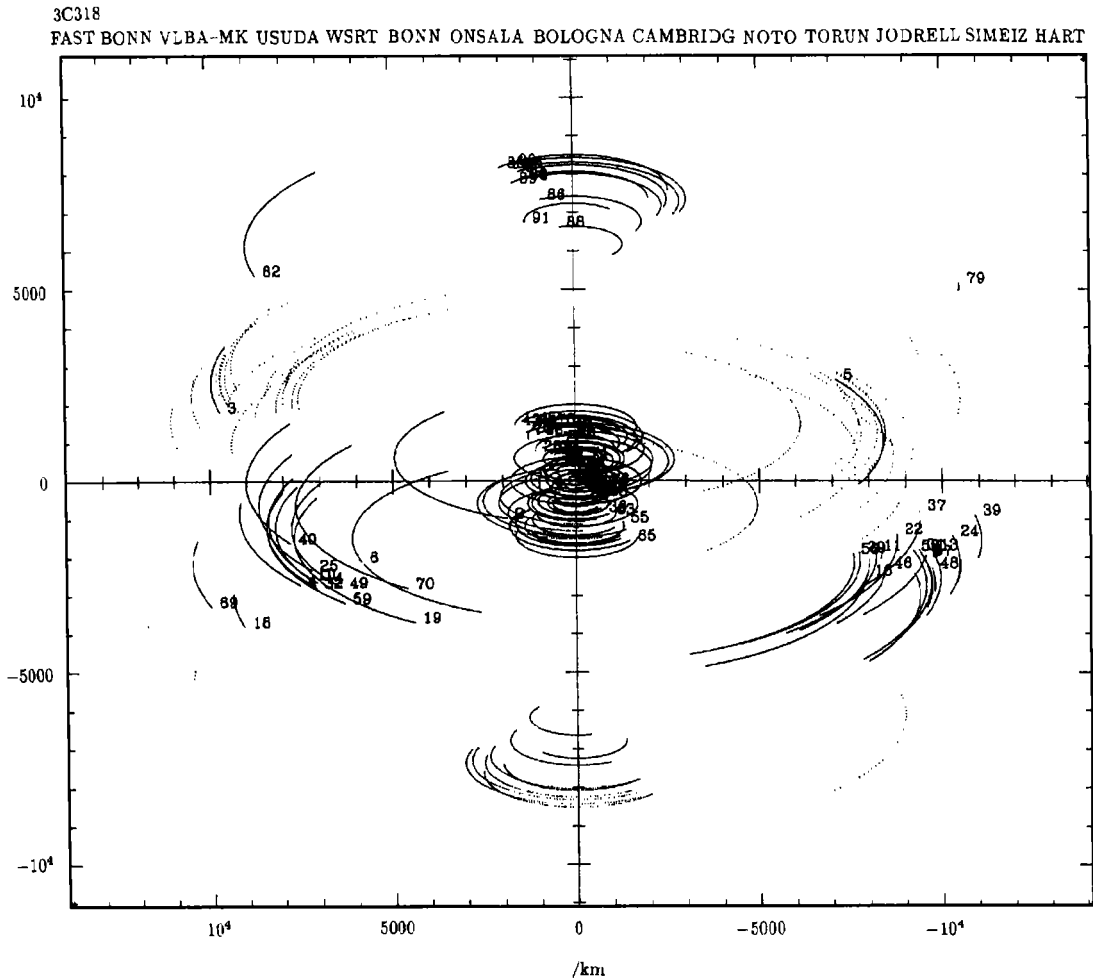


图 4 一个含 FAST、欧亚主要射电望远镜及 VLBA 在夏威夷的一个站组成 VLBI 网的 UV 覆盖图

计划的轨道天线直径仅有 8m，预期发射的 RADIOASTRON (俄国) 轨道天线直径也只有 10m，而轨道天线的固有特性，又要求快速成图，尽管它们和地面射电望远镜的联测可以使角分辨率比地面 VLBI 分别提高 3 倍和 10 倍，但只有和地面上最大的射电望远镜联测，才能获得足够的灵敏度，取得高质量的成图能力。FAST 和这两个轨道天线的相关孔径将分别达到 49 和 55m，已经远远超过了一般地面 VLBI 网中干涉仪对的相关孔径，而且它们可能有 4.9、1.6 GHz 和 327 MHz 三个共同的工作波段。不难设想，在未来若干年，如果能将一个孔径 3m 的天线发射并安装在月球表面，它与贵州 500m 球面镜的相关孔径也可达到 30m，而分辨率却比地面 VLBI 高了约 30 倍。

4 低频高灵敏度 VLBI 课题预测

和其他大型观测设施一样，高灵敏度 VLBI 可能取得的任何激动人心的新贡献不仅来自它以预期的高性能解决在筹划该设施时可期望解决的问题，而且来自未曾期望的发现，后者往往会开辟一个崭新的研究领域。

宇宙学的研究要求对弱源的高分辨率观测，如确定角径 - 红移 ($\theta-z$) 关系、自行 - 红移 ($\mu-z$) 关系等有助于研究其结构和动力学性质如何随宇宙历元改变，也有助于高红移源的观测、追踪 CRS 源的演化、尽可能长时间地跟踪喷流中弱节的动力学特点及演化。对较弱源的偏振观测将给出其磁场强度和方向以及相对论粒子的能量分布随时间的变化。

如果射电源计数以差分计数公式： $n_0(S) \propto S^{-2.5}$ 表示，则灵敏度提高 5 倍意味着可观测源是原可观测源的 55.9 倍，即使用积分计数公式： $N(S > S_0) \propto S_0^{-1.5}$ ，可观测源数也有 11 倍的增加。

低频研究是射电源研究上必然的频谱延伸，在低频可以看到高频观测不到的特性，从而有助于全面了解射电源中的物理过程。低频 VLBI 的观测的意义在于：许多致密源的频谱在 200 ~ 1000MHz 发生频谱反转，通常认为是同步加速自吸收所致，相应地存在 10 ~ 500 mas 的小尺度结构，可藉低频 VLBI 观测到；这些尺度的结构介于高频 VLBI 和综合孔径可分辨的细节之间，对它们的观测有助于了解毫角秒尺度和角秒尺度结构之间的物理联系和供能方式；低频变源中整体相对论运动的观测有助于解决短时间尺度变化及视超光速运动现象中的某些理论困难。

包含 FAST 等大型射电望远镜的低频高灵敏度 VLBI 观测研究的主要课题有^[25,26]：

- VLBI 选源巡天：对大红移类星体和活动星系核的巡天以及对不同红移弱射电源的巡天将有助于研究射电源的宇宙学演化 (如确定角径 - 红移 ($\theta-z$) 关系、自行 - 红移 ($\mu-z$) 关系等)、更精确的射电源计数；低反转频率射电源巡天将有助于揭示这些源中高分辨率谱特性及其物理环境。
- 射电源结构的观测研究：从大红移类星体和射电星系的致密结构的观测研究，进一步探索高亮度 ($> 10^{12}$ K) 源的致密结构的奥秘；激变射电源 (Blazar 天体) 结构的监测和其中与核相距尺度在 10 ~ 100 mas 子源自行的探测和研究，特别是 γ 射线 Blazar 天体中爆发源的演化、双重视超光速效应 (视超光速膨胀和视超光速运动) 的探索、以及相对论运动子源距离的直接测定等；低频变源的 VLBI 结构和星际闪烁

(星系际闪烁)、星际介质结构和模型的研究; 特殊源(如致密陡谱源、致密双源和 GHz 峰源等)的结构和介质环境研究, 可能的统一模式和不同结构源的演化系列。

- 引力透镜及微引力透镜的搜索和宇宙早期物质成团的探索。
- 低亮度射电区的观测: 大红移射电源或一般类星体和射电星系中致密核周围展区的辐射, 包括高频 VLBI 喷流的远端、射电瓣精细结构、反喷流、“晕”和“桥”的高分辨率探测等。
- 河外超新星膨胀速度和哈勃常数的测定。
- 河外 OH 超脉泽的搜索、其致密结构和运动的探测: 对河外超脉泽的搜寻和观测, 既需要高灵敏度又需要高角分辨率的观测设备, 其致密结构和运动的观测, 有助于了解河外源中的恒星形成过程、分布及其演化, 也可以藉此测定河外射电源的距离; 而银河系内 OH 脉泽的观测, 可确定密度 $10^5 \sim 10^9 \text{cm}^{-3}$ 的气体物质的动力学和物理条件, 研究与之相联系的特致密 HII 区、一定类型恒星形成期或晚型星的物质外流及拱星壳层中的动力学、几何及磁场。
- 激变射电星的 VLBI 观测研究: 恒星射电辐射一般较弱且呈瞬态, 其空间结构难以 VLBI 成像, 但对某些强射电双星已有了初步的观测, Arecibo 射电望远镜已经发现了时标约为 0.2s 的快速变化射电星, 研究恒星尺度上的快速变化对恒星物理有重要意义。而双星系统的物质交换或吸积与射电辐射的性质和变化有什么样的关系也正是高灵敏度 VLBI 可以探测的。
- 类星体和射电星系中中性氢的分布及结构: 通过中性氢在类星体和星系中的吸收线的高分辨率 VLBI 观测, 可以研究中性氢的分布到几十 pc 尺度的细节。
- 展源或巨星系中可能存在的陡谱核 (SSC) 的搜寻、观测和研究。

5 结 语

VLBI 天体物理已经在过去 30yr 里取得了巨大的成就, 但是已有的观测也留下了许多需要更精确和灵敏的观测才能解答的疑问, 在世纪交替的时刻全世界的射电天文学家已经在筹划新一代平方公里孔径的大射电望远镜 (SKA), 也探讨了 SKA 对高灵敏度 VLBI 天体物理可能作出的贡献^[28]。作为 SKA 的一个可能先导模型, FAST 已经得到我国科技部、中国科学院的支持, 得到我国许多大学和科研院所的积极响应, 预研工作有了很大的进展, 有望先于 SKA 成为世界上最灵敏的单孔径射电望远镜, 虽然它的灵敏度只及 SKA 预期灵敏度的 8%, 但仍然是当代已有最大射电望远镜灵敏度的数倍, 可对高灵敏度 VLBI 天体物理, 作出初步的富有成果的贡献。

参 考 文 献

- 1 Greenhill L J, Moran J M, Reid M J *et al.* *Ap. J.*, 1993, 406: 482
- 2 Miyoshi M, Moran J M *et al.* *Nature*, 1995, 373: 127
- 3 Gabuzda D C, Kochanev P Y, Kollgaard R I. *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.*, 1998, 144: 265
- 4 Taylor G B, Venturi T, Udomprasert P S. *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.*, 1998, 144: 113

- 5 Pushkarev A B, Gabuzda D C. *New Astron. Rev.*, 1999, 43 (8~10): 695
- 6 Polatidis A, Wilkinson P N et al. *New Astron. Rev.*, 1999, 43(8~10): 657
- 7 Krichbam T P, Kraus A, Otterbein K et al. *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.*, 1998, 144: 37
- 8 Moran J M. *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.*, 1998, 144: 1
- 9 Peason T J, Browne I W A et al. *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.*, 1998, 144: 17
- 10 Beasley A J, Bastian T S. *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.*, 1998, 144: 321
- 11 Fomalont E B, Bradshaw C F, Geldzahler B J. *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.*, 1998, 144: 339
- 12 Mioduszewski A J, Hjellming R M et al. *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.*, 1998, 144: 351
- 13 Rupen M P, Beasley A J et al. *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.*, 1998, 144: 355
- 14 Tingay S J, Preston R A, Piner B G et al. *New Astron. Rev.*, 1999, 43(8~10): 723
- 15 Vermeulen R C, Cohen M H. *Ap. J.*, 1994, 430: 463
- 16 Kellermann K I. *Nature*, 1993, 361: 134
- 17 Valtaoja E. *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.*, 1998, 144: 35
- 18 Wu S Y. In: Chen P-S ed. *Proc. 4th East Asian Meeting on Astronomy*, Kunming: Yunnan Observatory, 1999. 98
- 19 钱善璿等. *天文学进展*, 1985, 3: 78
- 20 洪晓瑜, 万同山等. *天体物理学报*, 1994, 14: 323
- 21 Chuprikov A A, Girin I A et al. *New Astron. Rev.*, 1999, 43(8~10): 747
- 22 Schwab F R, Cotton W D. A. J., 1983, 88: 688
- 23 Pauliny-Toth I I K. In "A Series of Lectures presented at B.A.O." (未出版), 1985, Lecture 1
- 24 U.S. VLBI Network Consortium ed. *VLBI Manual for U.S. VLBI Network*, Berkeley: U.C. Berkeley, 1988 chapter 2, 2-1
- 25 Wu S Y, Nan R D. *Publications of B.A.O.*, 1988, 11: 13
- 26 北京天文台 VLBI 课题组. "为建立低频 VLBI 实测手段开展低频 VLBI 天体物理研究给天文委员会的报告" (1988)
- 27 Alef W, Mantovani F, Garrett M A. *European VLBI Handbook*, Bologna: Bologna Radio Observatory, 1993
- 28 Krichbaum T P, Zensus J A, Witzel A. In: van Haarlem M P ed. *Perspectives on Radio Astronomy: Science with Large Antenna Arrays*, Dwingeloo, Netherlands: NFRA, 1999, 149

High-sensitivity VLBI and the Project FAST

Wu Shengyin Qian Shanjie Tian Wenwu

(Beijing Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

Abstract

Recent development of VLBI astrophysics, including essential achievements and constraint posed by the sensitivity, is briefly described at first in this paper. Then a brief review of exploring on lower-frequency VLBI, which is still not so mature at the moment, and trying to improve sensitivity of VLBI in both hard and soft wares in the recent decade is presented. Finally it is emphasized to discuss a potential contribution of planned FAST on improvement of VLBI sensitivity and to bring forward a prospect on high-sensitivity VLBI astrophysics at lower and middle frequencies due to participation of the FAST in the future.

Key words Sensitivity—VLBI astrophysics—Spherical radio telescope—Project FAST.