

空间 VLBI 的研究现状

沈 志 强

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

综述了过去近三十年中空间 VLBI 的发展。其内容包括空间 VLBI 的简短发展历史, 空间 VLBI 与地面 VLBI 的不同、空间 VLBI 的目前状况和空间 VLBI 的未来展望。着重介绍了作为首次空间 VLBI 的 VSOP 的各个方面情况, 并给出了 VSOP 的连续谱、谱线普查样本, 供参考。

关键词 航天器 — 技术: 干涉 — 技术: 空间 VLBI

分类号: P164

1 引 言

现代天体物理学观测涵盖了从射电低频到高能伽玛射线的整个电磁辐射, 所涉及的观测设备也已从地面走向太空^[1]。截止到 1996 年底, 射电波段是唯一没有空间望远镜观测的波段。1997 年 2 月 12 日, 日本成功地将一等效口径为 8m 的天线送上太空, 填补了这一空白, 标志着射电天文空间时代的最终到来^[2]。

在 60 年代中后期出现的甚长基线干涉 (VLBI) 测量是获得高空间分辨率的最为有效的观测方法。由地面射电望远镜组成的 VLBI 阵观测能达到毫角秒量级的空间分辨率, 至少是地面上其它天文波段 (如光学) 观测所能达到的 1000 倍。首次空间 VLBI (SVLBI 或 OVLBI, 下文简称为 SVLBI) 计划即日本的 VSOP (VLBI Space Observatory Programme) 利用一面在空间绕地轨道上和二十多面在地球上的射电望远镜的干涉测量, 将有效基线长度第一次延伸到地球之外, 进一步提高了分辨本领。

2 简短的历史回顾

2.1 早期 SVLBI 观测设想阶段 (七十年代)

一般而言, 射电天文干涉观测的分辨本领由工作波长 λ 和两面天线在垂直于源方向的投影距离 D 决定, 当 λ 和 D 分别以 cm 和 10^3 km 为单位, 以毫角秒 (mas) 为单位的角分辨率 θ

可以表为, $\theta = \lambda/D$ 。地面 VLBI 在 22GHz 的分辨率可达 200 微角秒 (μas), 是哈勃空间望远镜 (HST) 的 500 倍。更高分辨率的获得可以通过延长基线或高频观测, 后者即现今地面上进行的毫米波和亚毫米波 VLBI, 如 86GHz 可以提供好于 $100\mu\text{as}$ 的分辨率。但由于有限的相干积分时间、太高的接收机噪声以及较小的有效天线口径, 使得观测灵敏度与厘米波观测相比很不理想。毫米波 VLBI 能克服在低频上同步加速辐射自吸收导致的光学厚效应, 从而深入到活动星系核的中央, 但地球大气对毫米波观测中相位的影响很大。而且在对天体脉泽进行谱线观测研究时, 发射线频率是固定的, 此时加长基线是提高分辨率的唯一有效手段。地面 VLBI(GVLBI) 观测的最长基线无法超过地球的直径。于是在 70 年代初人们设想将 VLBI 天线送至太空, 提高基线长度, 以获得更高的分辨率, 从而形成 SVLBI 的概念。此后, 前苏联为检验卫星运载能力曾将一面 10m 天线送入太空站, 而美国等也提出过利用美国国家航空和航天局 (NASA) 的航天飞机进行 SVLBI 测试, 这些都推动了对 SVLBI 潜在能力及技术可行性的研究^[3]。

2.2 初次尝试 SVLBI 及其可行性论证阶段 (八十年代)

随着 GVLBI 观测的日趋成熟, SVLBI 在 80 年代进入实验性阶段, 集中体现在 QUASAT 计划的提出和 TDRSS 实验的成功。

- QUASAT^[4,5]: 该计划于 80 年代初在美国喷气推进实验室 (JPL) 形成。1982 年由欧洲空间局 (ESA) 和 NASA 联合正式向 ESA 提出立项建议, 目的是在太空放置一个 15m 级口径的天线, 工作频率为 0.3GHz、1.6GHz、5.0GHz 和 22GHz, 工作寿命为两年。在其前期研制阶段, 就 SVLBI 的技术要求 (如接收机、偏振、轨道参数等)、观测性能 (如分辨率、灵敏度、视场等)、数据分析成图能力以及预期的科学目标等作了较广泛的研究。尽管 QUASAT 计划因未能在 1988 年 ESA 的竞标中获胜而被迫取消, 但它为以后的 SVLBI 发展提供了有益经验。

- TDRSS^[6-10]: 1986—1988 年间, 利用 TDRSS (Tracking Data and Relay Satellite System) 通讯卫星上的 4.9m 天线和地面上的两个 64m 射电望远镜 (分别在日本的 Usuda 和澳大利亚的 Tidbinbilla), 对一批河外致密强源在 2.3 GHz 和 15 GHz 频率上进行了三次 VLBI 观测, 大部分源检测到干涉条纹, 证实了 SVLBI 技术的可行性, 并为确定今后 SVLBI 观测候选源提供了参照。在此期间, 前苏联于 80 年代中期提出了 RadioAstron 计划^[11], 日本也于 1987 年 3 月提出了 VSOP 计划^[12]。

2.3 SVLBI 正式开始观测阶段 (九十年代)

该阶段的显著标志是 VSOP 卫星在 1997 年 2 月 12 日被成功发射到绕地椭圆轨道^[13], 并顺利获得干涉条纹^[14], 从而使 SVLBI 观测成为事实。RadioAstron 计划也预计会在本世纪的最后几年间完成发射任务。

3 SVLBI 与 GVLBI 的差异

SVLBI 是 GVLBI 的自然延伸, GVLBI 天线也是 SVLBI 的组成部分。同 GVLBI 相比, SVLBI 在干涉阵的组成方面仅比 GVLBI 多了一面 (或多面) 安置在地球以外的射电望远镜 (空间射电望远镜 SRT)。SVLBI 与 GVLBI 的所有差异均是由于 SRT 引起的。例如, SRT

在太空中能够停留的时间(即寿命)就决定了整个 SVLBI 的最长可持续时间,而在某一时刻 SRT 低于所有地面跟踪站的水平极限时,SVLBI 就不能正常观测。归纳起来,这些差异主要表现在观测的设计、数据的采集记录及预相关处理(即条纹搜索)等几个方面。

在设计观测时,GVLBI 首先从目标源的赤纬、所需的 u - v 覆盖及 VLBI 天线性能(如工作频率、偏振特性等)考虑,选定了所需的 VLBI 阵后,再去决定具体的观测时间。而 SVLBI 正相反,空中天线绕地球运动轨道的随时间快速变化以及轨道在每一地球自转周期(24h)后的不可重复性,导致 u - v 覆盖也是时间的函数且没有重复。这就需要我们结合目标源的两维天文坐标(赤经和赤纬)、SRT 的进动和对 u - v 覆盖的具体需求(高动态范围成图或高分辨率检测等),先选定一个可观测时间段,再考虑地面 VLBI 站在该时间段内的情形去确定参加 SVLBI 观测的地面望远镜。换言之,GVLBI 的 u - v 覆盖仅是源赤纬的函数,SVLBI 的 u - v 覆盖则不仅与源的赤纬有关,还与源的赤经和观测历元有关。若源在某一时刻位于与卫星轨道面垂直的方向,将给出两维的高分辨率,而若源在接近轨道平面的方向上,则只有一维的 u - v 覆盖。

传统的 GVLBI 要求每个观测台站具有独立的高稳定度的频率标准,天线接收到的观测数据被实时地记录在各 VLBI 终端。SVLBI 系统中 SRT 的频率标准是由地面跟踪站提供,其观测到的数据则传回至地面跟踪站以特定格式被记录在磁带上。这就对 SRT 与地面跟踪站的信号传输提出了特殊的技术要求。

针对上述不同,人们专门发展了为 SVLBI 服务的计算机软件^[15],包括美国 JPL 的 FAKESAT 软件、匈牙利 SGO(Satellite Geodetic Observatory)的 SPAS(Space-VLBI Assistance Software)软件和加拿大 Calgary 大学的 SVPIS(Space VLBI Principal Investigator Software)软件。这些软件可以模拟 SRT 与地面 VLBI 站的联测情况,帮助研究者准备观测建议书。此外,美国国立射电天文台(NRAO)计划配合 SVLBI 观测,增强其 AIPS 中条纹拟合功能,扩大延迟-延迟率搜索范围,并加入了条纹率成图等任务^[16]。

4 VSOP 计划

VSOP 在经过了两年可行性研究基础上,由日本空间和宇航科学研究所 ISAS(Institute of Space and Astronautical Science)、国立天文台 NAO(National Astronomical Observatory)和射电研究实验室 RRL(Radio Research Laboratory)联合于 1987 年 3 月正式提出,1988 年得到经费支持,同时也得到世界各地天文学家的积极响应^[12]。1997 年 2 月 12 日从鹿儿岛太空中心 KSC(Kagoshima Space Center)成功发射升空,成为首枚 SVLBI 卫星^[13]。根据惯例,原名 MUSES-B(MUSES 是 MU Space Engineering Satellite 的首字母缩写,其中 MU 是 ISAS 发射火箭的名字,而 B 意为第二个)的卫星发射成功后被重新命名为 HALCA(Highly Advanced Laboratory for Communication and Astronomy)或日语中的 Haruka(遥远的意义)。HALCA 卫星每 6h 11min 绕地球一周,预期寿命为三年。卫星上配置了太阳叶片(Solar Paddle)和两个恒星跟踪仪(Star Tracker),而 Ku 波段通讯天线用于接收 5 个地面跟踪站的相位信号并发回射电天文观测数据,此外 GPS 系统将用于帮助确定卫星轨道参数。2 月 27 日,1.1m 直径的副反射面顺利张开在距主天线表面 3.4 m 的位置;2 月 28 日,主天线成功展开^[17]。5 月 13 日晚利用日本 Mitaka 相关器,在 Usuda 到 HALCA 基线上对 PKS1519-273 成功地搜索到了

条纹^[14]。到6月中旬,在另两个相关处理机上(加拿大的S2和美国的VLBA)也成功搜索到了条纹^[18]。所有这些条纹搜索都是在1.6GHz上进行的,另外正在进行5.0GHz和22GHz频率上的条纹搜索。

4.1 与VSOP观测相关的一些重要参数

在表1和表2中,我们列出了与VSOP观测有关的重要参数供参考^[19],一些参数值(如系统温度等)还有待于具体测试结果。VSOP天线具备了同时双频观测能力,天线的旋转速率约是 $2.25^\circ/\text{min}$,而典型的成图时间是2—4个轨道周期或13—26h。具体观测还必须考虑到HALCA卫星受到的种种限制^[19],如交食、太阳、月亮、地球和地面跟踪站、遥测站相对位置变化及天线的指向改变所需时间等^[19]。

表1 HALCA卫星预定轨道参数^[19]

HALCA卫星的开普勒轨道参数	
轨道半长轴 a	17878.14 km
轨道偏心率 e	0.587
轨道的倾角 i	$31^\circ.3$
升交点赤经 Ω	$77^\circ.4$
近地点角距 ω	$105^\circ.5$
平均近点角 M	$0^\circ.0$
寿命	3 yr
HALCA卫星的导出参数	
卫星绕地轨道周期 P	6.1 h
卫星近地点高度 r_p	1000 km
卫星远地点高度 r_a	22000 km

表2 VSOP天线观测参数^[19]

参量	数值		
孔径面积	50.1 m ² (等效于8m的天线口径)		
观测频带	$L(1.60\text{--}1.73\text{ GHz})$	$C(4.7\text{--}5.0\text{ GHz})$	$K(22.0\text{--}22.3\text{ GHz})$
对应波长	20 cm	6 cm	1.2 cm
偏振状态	左旋圆偏振(LCP)		
孔径效率	35%	54%	47%
系统温度	100 K	120 K	200 K
系统等效流量强度	14500 Jy	12200 Jy	23500 Jy
检测极限*	90mJy	110mJy	450mJy

* 7 倍于 VSOP(8m)-VLBA(25m) 基线上的热噪声

由于现有的地面 VLBI 站之间有不同的数据记录系统,如日本的 VSOP 系统、美国的 VLBA、欧洲的 MKIV 以及加拿大等国采用的 S2 系统等,使得数据的相关处理机选择必须根据具体的观测台站来决定^[20]。共有四个相关处理机可为 VSOP 观测服务,它们分别是日本 NAO 在东京 Mitaka 的 10 台站 VSOP 相关器、美国 NRAO 在 Socorro 的 20 台站 VLBA 处理机、加拿大自治领射电天体物理台 DRAO(Dominion Radio Astrophysical Observatory) 在 Penticton 的 S2 相关处理机和计划于 1997 年底前完成的欧洲荷兰 NFRA 在 Dwingeloo 的 EVN-JIVE 的 16 台站 MKIV 相关器。但大部分的数据将会在 Mitaka 和 Socorro 的相关处理机上处理。日本 Usuda 的二台站近实时相关器可进行快速的条纹搜索。当观测数据涉及不止一个磁带记录格式时,必须先先在 VSOP 处理器上进行格式转换,目前可以进行的转换是从 VLBA 和 S2 到 VSOP。

4.2 VSOP 的科学管理组成

整个 VSOP 计划是一个庞大的工程, 由项目总管 Hirosawa 和首席科学家 Hirabayashi 领导。从其科学管理组成来看, 主要设立了以下几个机构^[21]。首先是建立于 1990 年的 VSOP 国际科学理事会 VISC(VSOP International Scientific Council), 负责监督 VSOP 的管理, 制定政策和确定 VSOP 能够达到的科学目标, 成员来自世界各国, 现任主席由日本 ISAS 的 Hirabayashi 与澳大利亚 ATNF 的 Jauncey 共同担任。然后还设有科学评议委员会 SRC(Scientific Review Committee), 负责对收到的观测建议书的科学意义作出评价。再者就是 VSOP 科学操作工作组 VSOG(VSOP Science Operations Group), 主要是负责日常观测的安排。此外已有的全球 VLBI 工作组 GVWG(Global VLBI Working Group) 也将帮助安排 SVLBI 的具体观测。这里值得一提的是 VSOP 普查工作组 SWG(Survey Working Group)^[22] 将领导对活动星系核和脉泽源的 VSOP 普查(详见 4.5 节)。

4.3 VSOP 的优势

(1) 提供综合孔径超过地球直径的射电观测, 极大地提高了观测分辨本领。VSOP 在高于地面 22000km 高度的轨道上将提供约 30000km 的实际观测基线长度, 三倍于地面上所能达到的最长基线, 在 K 波段 (22 GHz) 给出约 $50\mu\text{as}$ 的分辨率, 使我们能够获得更为可靠的射电源精细结构, 对研究诸如活动星系核中射电喷流的产生和传播提供了有力的手段。

(2) 首次提供了全天的 VLBI 成图观测。由于历史的原因, 地面上的大多数射电望远镜分布在北半球, 构成了北天较好的 VLBI 阵, 如美国的 VLBA 和欧洲的 EVN, 只能对北天区源进行较全面的高动态范围成图。对赤道附近的源, 尤其是南天源仅能利用澳大利亚和南非的射电望远镜进行有限的 VLBI 观测。而 HALCA 卫星绕地球运动可覆盖整个天球, 与地面上约 25 面天线的综合观测将可以对整个天空的任何射电源都提供满意的 $u-v$ 覆盖。

(3) HALCA 卫星轨道绕地球一周的 6.1h 观测, 就可以提供一张源的粗图。这种快速成图能力可以用来监测源爆发过程中时标小于一天的快速结构变化。

(4) 由于 HALCA 卫星绕地球运行的周期与地球自转周期不成整数倍关系, 它与地面 VLBI 站观测得到的 $u-v$ 覆盖在各个运行周期内都是不相重复的, 从而每一周期内的观测都将提供 $u-v$ 平面上新的采样点, 用以充满 $u-v$ 平面。而 1000km 的卫星近地点高度将有利于缩小 $u-v$ 平面上的空洞, 降低综合束旁瓣, 使孔径综合更完善。受 $u-v$ 平面上空洞限制的视场大小也得以增大, 低综合束旁瓣又将使超分辨率成图有可能被用于对小尺度特征的观测研究。

但是, 由于 SRT 的口径有限, 加之接收机系统温度偏高, 首次空间 VLBI 观测的灵敏度明显不如常规的 GVLBI 观测, 也就限制了可检测源的数目。

4.4 VSOP 的科学目标

活动星系核 (AGN) 是 SVLBI 的研究对象, 也是 VSOP 的主要研究目标, 而 H_2O 脉泽 (22 GHz) 和 OH 脉泽 (1.6 GHz)、射电星和脉冲星等也将是观测的目标。通过对这些源的 VSOP 观测, 可望获得较 GVLBI 观测更高分辨率且具较好动态范围的图象。依其优先顺序, VSOP 期望能获得的科学目标如下^[23]:

- (1) 活动星系核的高分辨率成图;
- (2) 视超光速源结构变化的监测;
- (3) 活动星系核中自行-红移关系 ($\mu-z$ 图) 测量;
- (4) 河内脉泽斑大小的分布情况;

(5) 利用河外水脉泽运动的测量直接测定到河外星系的距离;

(6) 射电星的高分辨率成图。

VSOP 的 SRC 推荐了一些需特别观测的射电强源组成六个重点科学项目 KSPs (Key Science Programs), 已为 VISC 采纳, 它们是^[24]:

(1) 闪焰源 (Blazars);

(2) 高亮温度源及其 Intra-Day 变化性;

(3) 个别源 (3C273, 3C279 和 3C345) 中的喷流运动;

(4) 重点观测源 (NGC4258, Centaurus A 和 Virgo A);

(5) 脉泽斑 (Maser Spots);

(6) 河外巨脉泽 (Megamasers)。

KSPs 将用去 VSOP 普通观测时间 GOT (General Observing Time) 的一半, 在观测的设计规划及时间的安排上都将得到优先考虑。SRC 已从高质量的观测建议书中遴选一批组成 KSPs, 在首次提交的 150 份建议书中, 有 47 份至少有一个实验被纳入了 KSPs, 成为 VSOP 科学观测的一个极其重要的组成部分。

VSOP 的观测时间分为三部分^[25]: 50% 属于 GOT, 25% 归于普查观测, 还有约 25% 用于 VSOP 工程自身检验和校准等。此外, 还有 Targets of Opportunity 时间, 特意留给临时提出的且有时间要求的天文观测, 如超新星爆发等。VSOP 的 GOT 时间采取征集观测建议书的形式, 所提的建议书将先由 VSOG 进行卫星观测技术的可行性评估, 然后递交国际 SRC 就其科学方面的优劣打分并推荐给 VISC, 经由 VISC 最后批准同意。一些受到很高评价的建议书将被吸收到 KSPs。建议书一旦被 SRC 和 VISC 接收, 即被列入观测计划。具体的 GOT 时间又一分二, 一半给 KSPs, 另一半属于各个被接收建议书的提出者。

4.5 VSOP 的普查观测

一般来说, VSOP 的普查将充分利用由有限的地面站参加的 VSOP 时间, 这些采样观测难于用于高质量成图, 但作为巡天观测是足够了。有关某个特定源的巡天结果对获得该源 GOT 时间的研究人员是公开的。VSOP 的普查项目由 SWG 负责, SWG 成立于 1995 年 9 月, 成员包括世界各地天文学家。该工作组已开展了对 AGN 和脉泽源的地面 VLBI 预观测, 并确定了两个普查样本: AGN 的连续谱观测样本和脉泽源的谱线观测样本。

- 连续谱普查^[26]: 连续谱普查样本的选源标准是: (1) 5GHz 频率流量密度大于 1.0 Jy; (2) 银纬大于 10° ; (3) 谱指数大于 -0.5。另外, 所有 5GHz 流量密度大于 5.0 Jy 的源, 不论其银纬和谱指数如何, 均收入巡天样本中, 总共 370 颗源 (见表 3)。其中的南天源从 Parkes-MIT-NRAO 源表中选出, 北天源则从 GB87 源表中选出, 在确定北纬 70° 以上的源时, 也参考了 Kuhr 等人的表。由于河外源流量的变化性, 表 3 列出的有些源的流量测量值小于 1.0 Jy。该样本在任何历元的完整性不超过 95%。

该样本源的最后确定取决于 VSOP 系统的性能及巡天观测能分配到的具体时间。只有在 VSOP 系统测试完成后, 得到了在三个频率上的灵敏度、相干时间等, 并综合考虑了地面参加的台站, 才能开始 VSOP 的巡天观测。117 颗 5 GHz 流量大于 2.0 Jy 的源 (表 3 中有 * 的源) 将肯定会列入连续谱普查源样本。每一次观测都将持续 VSOP 的一个轨道周期约 6h。每年用于连续谱巡天的观测时间最多不超过 VSOP 总观测的 15%, 即 50 天左右。这意味着每年可进行约 200 次普查观测, 则在三年里可观测 600 次。所

有样本源都将在 5 GHz 上至少被观测一次, 亮的强源可能有 2—3 次。在 22 GHz 上有一约 50 个源将被观测 1—2 次。而在 1.6 GHz 上只对一些强源观测一次。

- 谱线普查^[27]: VSOP 谱线普查的样本包括三类脉泽源 (详见表 4): (a) 低质量原恒星, (b) 大质量恒星形成区和 (c) 主序后星。脉泽源的时变性要求在 VSOP 观测前后有地面站的单天线观测配合, 因此 VSOP 谱线巡天样本可以作为地面监测的候选源。当前还很难估计 VSOP 脉泽观测的检测性, 地面的预 VSOP 观测将是很关键的, 现有样本无疑将会被修改。已有的选源标准分别是: (1) 远红外光度小于 300 太阳光度 (L_{\odot}), 且水脉泽峰值流量大于 10Jy 的外流源和分子核 (低质量原恒星); (2) 远红外光度大于 10000 L_{\odot} , 且水脉泽峰值流量大于 120Jy (大质量恒星形成区) 和 (3) 水脉泽峰值流量大于 35Jy (主序后星)。对应的三类脉泽源数目分别为 22、26 和 20 (见表 4, 其中 S 表示在长于 7000km 基线上的相关流量, NYO 表示尚未被观测过), 最终的源数将限制为 15、15 和 10。

通过对这些脉泽源的普查, 将可测量脉泽斑的结构大小和亮温度以及它们随时间的变化, 这些工作将直接用于对脉泽物理学和星际介质散射的研究。同时也将研究 H_2O 和 OH 脉泽在恒星形成区的分布, 探索主序后星中的星周包层的动力学结构。由于有的脉泽范围大至几十到几百 mas, 这就需要大的观测视场。

表 3 VSOP 连续谱普查样本源 (共 370 个源)

IAU 源名 (2000.0)	其它源名 (1950.0)	5 GHz 流量 /Jy	IAU 源名 (2000.0)	其它源名 (1950.0)	5 GHz 流量 /Jy
J0006-0623	0003-066	2.46 *	J0013+4051	0010+405	1.04
J0019+7327	0016+731	1.71	J0029+3456	0025+345	1.31
J0038+4137	0035+413	1.11	J0042+2319	0039+230	1.64
J0059+0006	0056-001	1.35	J0059-7210		1.23
J0105+4818		1.09	J0106-4034	0104-408	2.58 *
J0108+0135	0106+013	3.39 *	J0111+3906	0108+388	1.32
J0115-0127	0112-017	1.54	J0116-1136	0113-118	1.49
J0119+0829		1.19	J0119+3210	0116+319	1.57
J0120-2701	0118-272	1.00	J0121+0422	0119+041	1.21
J0125-0005		1.23	J0126+2558	0123+257	1.35
J0126-0123		1.30	J0133-3629		1.38
J0136+4751	0133+476	1.88	J0137+3309	3C48	5.75 *
J0137+4751	0133+476	1.82	J0140+0845		2.98 *
J0149+0555	0146+056	1.45	J0152+2207	0149+218	1.06
J0153-3310	0150-334	1.38	J0155-4048	0153-410	1.17
J0157+7442	0153+744	1.55	J0202-7620	0202-765	1.02
J0204+1514	0202+149	2.68 *	J0204-1701	0202-172	1.35
J0210-5101	0208-512	3.20 *	J0217+0144	0215+015	1.61
J0217+7349	0212+735	2.28 *	J0221+3556	0218+357	1.50
J0224+2750		0.86	J0226+3421		1.51
J0231+1322	0229+131	2.43 *	J0232-0645		0.52
J0237+2848	0234+285	3.38 *	J0238+1637	0235+164	1.93
J0239+0416	0237+040	1.06	J0240-2309	0237-233	3.63 *
J0241-0815	NGC1052	3.16 *	J0242+1101	0239+108	1.38

续表 3

IAU 源名 (2000.0)	其它源名 (1950.0)	5 GHz 流量 /Jy	IAU 源名 (2000.0)	其它源名 (1950.0)	5 GHz 流量 /Jy
J0251+4315	0248+430	1.41	J0253-5441	0252-549	1.19
J0301+3512		0.86	J0303-6211	0302-623	1.86
J0309-6058	0308-611	1.10	J0312+0132		1.03
J0313+4120	0309+411	0.52	J0318+4153		1.49
J0319+4130	3C84	42.37 *	J0321+1221	0319+121	1.61
J0321-3711	FOR-A	45.02 *	J0334-0111		0.79
J0336+3218	NRAO140	1.96	J0339-0146	CTA26	3.01 *
J0348-2749		1.44	J0359+5057	NRAO150	10.10 *
J0403-3605	0402-362	1.85	J0405+3803		0.94
J0405-1308	0403-132	2.75 *	J0412+2305		1.00
J0414+0534	0411+054	1.11	J0414+3418		1.44
J0423+0031	0422+004	0.58	J0423-0120	0420-014	4.36 *
J0424+0036	0422+004	1.12	J0424-3756	0422-380	1.71
J0428-3756	0426-380	1.20	J0431+2037	0428+205	2.81 *
J0433+0521	3C120	3.49 *	J0437+2939	3C123	14.88 *
J0437-1844	0434-188	1.09	J0442-0017	NRAO190	1.08
J0450-8100	0454-810	1.36	J0453-2807	0451-282	2.17 *
J0455-3006		1.47	J0457-2324	0454-234	1.86
J0459+0229	0457+024	1.69	J0501-0159	0458-020	3.32 *
J0503+0202	0500+019	1.89	J0508+8432	0454+844	1.15
J0509+0541		1.03	J0511+1357		0.58
J0519-4546	PIC-A	5.83 *	J0522-3628	0521-365	8.18 *
J0525-4557	0524-460	1.85	J0527-1241		1.72
J0530+1332	0528+134	2.99 *	J0532+0732	0529+075	1.85
J0535-6734		1.55	J0538-4405	0537-441	4.80 *
J0538-6905	0537-692	24.00 *	J0539-2839	0537-286	1.23
J0541-0154		5.56 *	J0541-0541	0539-057	1.10
J0542+4951	3C147	7.52 *	J0555+3948	0552+398	5.43 *
J0604-3156		1.39	J0607-0623		7.30 *
J0608-0834	0605-085	2.23 *	J0609-1542	0607-157	2.47 *
J0614+6046	0609+607	1.06	J0616-3456	0614-349	1.44
J0620-3711		1.36	J0627-0553		7.52 *
J0627-3529		2.25 *	J0635-7516	0637-752	6.40 *
J0636-2031		1.30	J0636-2041		1.33
J0644-3459		1.05	J0646+4451	0642+449	1.19
J0648-3957		1.12	J0713+4349	0710+439	1.63
J0724+1601		0.58	J0738+1742	0735+178	2.17 *
J0739+0136	0736+017	1.70	J0741+3112	0738+313	2.35 *
J0743-6726	0743-673	2.23 *	J0745+1011	0742+103	3.46 *
J0745-0044	0743-006	1.98	J0748+2400	0745+241	1.20
J0750+1231	0748+126	1.26	J0808+4950	0804+499	1.22
J0808-0751	0805-077	1.60	J0811+0146	0808+019	1.47
J0818+4222	0814+425	1.89	J0820-1258	0818-128	1.01
J0823+2223		1.61	J0824+3916	0821+394	1.01
J0824+5552	0820+560	1.20	J0825+0309	0823+033	1.37
J0831+0429	0829+046	2.14 *	J0834+5534	0831+557	5.78 *
J0840+1312		1.27	J0841+7053	0836+710	2.42 *

续表 3

IAU 源名 (2000.0)	其它源名 (1950.0)	5 GHz 流量 /Jy	IAU 源名 (2000.0)	其它源名 (1950.0)	5 GHz 流量 /Jy
J0842+1835	0839+187	0.95	J0854+2006	OJ287	2.69 *
J0854+5757	0850+581	1.19	J0900-2808		2.22 *
J0903+4650	0859+470	1.28	J0916+3854		0.56
J0920+4441	0917+449	1.03	J0921+6215	0917+624	1.32
J0921-2618	0919-260	2.33 *	J0927+3902	4C39.25	7.48 *
J0948+4039	0945+408	1.59	J0949+6614		1.41
J0956+2515	OK290	1.23	J0957+5523	4C55.17	2.27 *
J0958+6534	0954+658	1.42	J1006+3453	3C236	1.67
J1014+2301	1012+232	1.13	J1018-3144	1015-314	1.78
J1035+5628	1031+567	1.20	J1035-2011	1032-199	1.02
J1037-2934	1034-293	1.48	J1041+0242		1.12
J1041+0610	1038+064	1.33	J1042+1203	3C245	1.74
J1044+8054	1039+811	1.15	J1048-4113		1.00
J1051+2119	1049+215	1.29	J1051-3137	1048-313	1.02
J1058+0133	1055+018	4.12 *	J1058+1952		1.68
J1058-8003	1057-797	2.13 *	J1107-4449	1104-445	3.33 *
J1118+1234	1116+128	2.01 *	J1118-4634	1116-462	1.87
J1125+2610	1123+264	1.14	J1127-1857	1124-186	1.62
J1145-4836		1.38	J1146-2447	1143-245	1.49
J1146-3328		1.11	J1147-3812	1144-379	1.83
J1150-0024	1148-001	1.76	J1153+8058	1150+812	1.20
J1158+2450	1155+251	1.25	J1159+2914	1156+295	1.54
J1205-2634		1.15	J1209-2406		1.07
J1215+3448	1213+350	1.15	J1215-1731	1213-172	1.74
J1217+0336		0.55	J1218-4600	1215-457	2.40 *
J1224+0330	1222+037	1.24	J1224+2122		1.26
J1225+1253	3C272.1	3.60 *	J1229+0202	3C273B	43.63 *
J1230+1223	3C274	61.16 *	J1231-0224		1.02
J1239-1023	1237-101	1.18	J1242-0446		1.04
J1246-0730	1243-072	1.10	J1246-2547	1244-255	2.32 *
J1256-0547	3C279	10.00 *	J1257+3229		0.53
J1257-3154	1255-316	1.41	J1309+1154	1307+121	1.29
J1310+3220	1308+326	1.13	J1316-3339	1313-333	1.09
J1324-1049		0.86	J1325-4257	CEN-A	66.08 *
J1331+3030	3C286	6.32 *	J1337-1257	1334-127	2.84 *
J1347+1217	1345+125	3.09 *	J1351-1449		1.06
J1357+1919	1354+195	2.74 *	J1357-1744		1.01
J1407+2826	OQ208	2.42 *	J1411+5212	3C295	7.40 *
J1415+1320	1413+135	1.20	J1419+5423	1418+546	1.71
J1419-1928		1.02	J1424-4913	1421-490	5.76 *
J1427-4206	1424-418	2.60 *	J1430+1044		1.24
J1435-4821		1.08	J1454-3747	1451-375	1.72
J1501-3918		1.16	J1504+1029	1502+106	1.60
J1506+3730	1504+377	1.00	J1507-1652	1504-166	2.84 *
J1512-0905	1510-089	3.30 *	J1513-1012	1511-100	1.22
J1516+0015		1.63	J1517-2422	1514-241	2.01 *
J1522-2730	1519-273	1.84	J1526-1350		1.34

续表 3

IAU 源名 (2000.0)	其它源名 (1950.0)	5 GHz 流量 /Jy	IAU 源名 (2000.0)	其它源名 (1950.0)	5 GHz 流量 /Jy
J1530-4231		1.38	J1534+0131	1532+016	1.30
J1540+1447	1538+149	1.21	J1543-0757		1.01
J1546+0026		1.31	J1550+0527	1548+056	3.28 *
J1556-7914	1549-790	4.68 *	J1602+3326	1600+335	2.05 *
J1608+1029	1606+106	1.69	J1613+3412	1611+343	2.49 *
J1615-6054		8.40 *	J1617-7717	1610-771	3.35 *
J1624-6809	1619-680	2.12 *	J1625+4134	1624+416	1.36
J1625-2527	1622-253	3.45 *	J1626-2951	1622-297	2.26 *
J1635+3808	1633+38	3.19 *	J1637+4717		1.33
J1638+5720	1637+574	1.81	J1640+1220	1638+124	1.29
J1640+3947	NRAO512	1.28	J1642+3948	3C345	8.36 *
J1642+6856	1642+690	1.52	J1642-0621		1.20
J1644-7715		2.55 *	J1647-6437		1.33
J1651+0459	3C348	9.53 *	J1653+3945	DA426	1.37
J1658+0515	1656+053	1.43	J1658+0741	1655+077	1.50
J1658+0741	1655+077	1.65	J1658+4737	1656+477	1.42
J1658-0739		1.01	J1702-7741		1.15
J1719+0036		1.10	J1719-1420		0.83
J1720-0058	3C353	8.91 *	J1723-6500	1718-649	4.37 *
J1724-0242		0.96	J1726-6427		1.34
J1727+4530	1726+455	1.07	J1730-2129		6.64 *
J1733-1304	NRAO530	6.99 *	J1734+0926		0.89
J1735+5048	1734+508	0.80	J1740+5211	1739+522	1.13
J1743-0350	1741-038	2.37 *	J1744-5144	1740-517	3.90 *
J1745-0753		1.41	J1751+0938	1749+096	2.28 *
J1800+7828	1803+784	2.10 *	J1801+4404	1800+440	1.15
J1804+0101		1.57	J1806+6949	3C371	2.19 *
J1809-4552	1806-458	1.10	J1812+0651		1.25
J1819-5521	1815-553	1.12	J1824+1044	1821+107	1.12
J1824+5651	1823+568	1.13	J1832+2833	1830+285	1.07
J1833-2103	1830-21A	7.92 *	J1837-7108	1831-711	2.29 *
J1902+3159	3C395	1.92	J1911-2006	1908-201	2.30 *
J1912-8010	1903-802	1.30	J1914-2927		0.54
J1924-2914	1921-293	6.30 *	J1925+2106	1923+210	1.55
J1927+7358	1928+738	3.56 *	J1932-4536		1.01
J1937-3957	1933-400	1.13	J1939-6342	1934-638	5.91 *
J1940-6908	1935-692	1.02	J1949-1957		1.33
J1955+5131	1954+513	1.61	J1957-3845	1954-388	1.94
J1959+4043	CYG-A	100.00 *	J2000-1748	1958-179	1.00
J2003-3252	2000-330	1.25	J2005+7752	2007+777	1.66
J2009-4849	2005-489	1.19	J2022+6137	2021+614	2.74 *
J2031+1219	2029+121	1.22	J2101+0340	2059+034	1.31
J2109-4110	2106-413	2.08 *	J2110-1020		1.18
J2115+2933	2113+293	1.19	J2123+0535	2121+053	2.52 *
J2129+0733		0.67	J2129-1538	2126-158	1.19

续表 3

IAU 源名 (2000.0)	其它源名 (1950.0)	5 GHz 流量 /Jy	IAU 源名 (2000.0)	其它源名 (1950.0)	5 GHz 流量 /Jy
J2131-1207	2128-123	2.99 *	J2136+0041	2134+00	10.47 *
J2147+0929	2144+092	1.14	J2148+0657	2145+067	4.24 *
J2151-3028	2149-306	1.34	J2152-7807	2146-783	1.13
J2158-1501	2155-152	3.09 *	J2202+4216	VR422201	3.59 *
J2203+3145	2201+315	2.86 *	J2206-1835	2203-188	4.27 *
J2207-5346	2204-540	1.41	J2212+2355	2209+236	1.21
J2218-0335	2216-038	2.72 *	J2225+2118		1.21
J2225-0457	3C446	6.38 *	J2229-0832	2227-088	2.42 *
J2230+6946	2229+695	1.37	J2232+1143	CTA102	3.74 *
J2235-4835	2232-488	1.10	J2236+2828	2234+282	1.60
J2239-5701		1.06	J2243-2544		1.22
J2246-1206	2243-123	2.66 *	J2249+1136		1.12
J2250+1420		1.18	J2253+1608	3C454.3	15.93 *
J2255+4202	2253+417	1.12	J2257+4154	2253+417	1.11
J2257-3627		1.15	J2258-2758	2255-282	2.13 *
J2311+3425		1.03	J2320+0513	2318+049	1.18
J2322+2732	2319+272	1.00	J2329-4730	2326-477	2.21 *
J2330+1100	2328+107	1.16	J2331-1556	2329-162	1.88
J2336-5236	2333-528	1.59	J2341-5816		1.06
J2346+0930	2344+09A	1.38	J2354+4553	2351+456	1.14
J2357-1125	2354-116	1.41	J2357-5311	2355-534	1.78
J2358-1020	2355-106	1.62	J2358-6054		6.02 *

4.6 VSOP 的观测

HALCA 卫星上的观测数据由地面 5 个跟踪站接收记录, 它们是日本 Usuda 站 (10m), 美国 Green Bank 站 (14m), 以及美国 NASA 的三个深空网 DSN(Deep Space Network) 站 (分别分布在美国的 Goldstone 站, 澳大利亚的 Tidbinbilla 站和西班牙的 Madrid 站, 都是 11m 口径的射电望远镜)。在初期测试和紧急情形下, 还会用到一个 26m 的 DSN 站。而地面参加台站的协调将由 GVWG 和 VSOG 负责。

第一次征集观测建议书通知 AO(Announcement of Opportunity) 是 1995 年 6 月 30 日发布的, 11 月 17 日截止^[25], 1996 年 4—5 月间发出结果通知。正式的第一轮 (Phase I) 天文观测将持续约 17 个月。VSOP 的 GOT 观测于 1997 年 5 月开始设计, 先在 1.6 GHz, 然后是 5 GHz, 最后到 22 GHz。从 1997 年 9 月进入正常的 VSOP 观测。VSOP 的观测以 4 个月为一单元 (block)。在每一单元开始前, 将由 VSOG 确定具体的 VSOP 的观测计划并通知相应的各个地面射电望远镜 (GRTs) 观测台站, 而每个观测的主要负责人 (PI) 将在该单元开始前 6 周被告知具体的时间以及一些与观测设计有关的重要参数。正式观测前 2—3 周, VSOG 将寄来用 NRAO SCHED 程序生成的用于 GRTs 观测的纲要 (summary) 文件, 该文件应包括所有与观测有关的信息。每个有观测的研究者需仔细检查各个参数 (如源的精确位置、HALCA 和 GRTs 的校准以及 Doppler 位移等)。若有疑问, 在任何时候都可直接与 VSOP 委员会和 VSOG 用电子邮件联系。从相关器出来的数据在 18 个月之后将对外公开, 任何人都可索取。

表 4 VSOP 谱线普查样本源 (分三类共 68 个源)
(a) 低质量原恒星 (Low mass protostars) (共 22 颗)

源名	源位置坐标 (1950.0)	流量 /Jy	距离 /Kpc	附注
IRAS 16293-2422	16 29 20.9/-24 22 16	2270	0.16	
L1448	03 22 30.8/+30 34 59	729	0.30	
YLW 16	16 24 26.0/-24 32 52.9	452	0.16	$S < 5$ Jy
OMC2	05 32 59.8/-05 11 28.9	189	0.45	
RNO 15	03 24 34.0/+30 02 36	141	0.50	
IC 1396-west	21 24 38.7/+57 43 14	135	0.75	
IC 1396 north	21 39 10.3/+58 02 29	135	0.75	
IC 1396 east	21 44 30.7/+57 12 29	135	0.75	
IRAS 06061+2151	06 06 07.3/+21 51 12	129	0.10	
NGC 1999(HH1)	05 33 53.2/-06 46 50	64	0.45	
OMC(2)2	05 32 58.2/-05 07 36.0	55	0.44	
HHL-50	07 22 33.4/-24 28 58.0	41	0.40	
L1660	07 18 00.8/-23 56 42	34	1.00	
NGC1333-IRS1	03 25 56.6/+31 05 19	32	0.35	
L988-a	21 00 44.9/+49 51 13	25	0.70	
L1204B	22 19 55.7/+63 22 12	22	0.90	
L1157	20 38 39.6/+67 51 33	21	0.40	
IRAS 00379+6248		13	1.60	
IRAS 07111-1211	07 11 09.9/-12 11 40	13	1.30	
IRAS 07077-1026	07 07 43.5/-10 26 49	10	1.20	
HH7-11 SSV13	03 25 58.0/+31 05 45	10	0.50	
L1287				

(b) 大质量恒星形成区 (Massive star forming regions) (共 26 颗)

源名	源位置坐标 (1950.0)	流量 /Jy	距离 /Kpc	附注
Ori KL IRC2	05 32 47.0/-05 24 23.0	248300	0.4	$S < 5$ Jy
W49 N	19 07 49.8/+09 01 17.0	37060	11.6	$S > 8$ Jy
W3 OH	02 23 17.3/+61 38 58.0	1742	5.0	$S > 8$ Jy
Sgr B2M	17 44 09.9/-28 21 59.9	4230	7.5	$S > 8$ Jy
03124-0011	18 46 09.7/-01 36 38.0	4209	13.0	
W51 M	19 21 26.2/+14 24 44.0	3041	5.6	$S > 8$ Jy
OH43.8-0.1	19 09 31.2/+09 30 51.0	2718	3.2	
W51 N	19 21 22.4/+14 25 13.0	1728	5.6	$S > 8$ Jy
W75N	20 36 50.5/+42 27 01.1	979	2.8	$S > 8$ Jy
W44	18 50 46.4/+01 11 10.0	830	3.7	
NGC2071	05 44 31.3/+00 20 48.0	740	0.5	$S < 5$ Jy
05978+0006	19 41 04.2/+23 36 42.0	530	5.4	
Cep A	22 54 18.9/+61 45 44.0	404	0.7	$S < 5$ Jy
10860+0049	22 50 37.0/+59 44 50.0	357	5.0	
ON2N	20 19 51.8/+37 17 01.0	329	3.7	$S < 5$ Jy
00868-0036	18 03 59.3/-21 37 39.9	320	4.5	NYO
03520-0074	18 55 40.7/+01 36 30.0	230	2.6	NYO
W43 (M3)	18 45 11.0/-01 57 57.0	250	7.3	NYO

续表 4(b)

源 名	源位置坐标 (1950.0)	流 量 /Jy	距 离 /Kpc	附 注
09753+0319	21 30 37.0/+55 40 36.0	232	8.5	
Mon R2 IRS3	06 05 21.7/-06 22 35.0	215	1.9	$S < 5\text{Jy}$
W 31 (2)	18 07 30.7/-19 56 37.9	182	16.8	NYO
W 31 (1)	18 05 40.4/-19 52 23.0	181	5.5	NYO
S158	23 11 36.0/+61 11 49.0	156	6.2	
01961-0023	18 24 50.0/-11 58 21.9	144	2.6	
ON 1	20 08 09.9/+31 22 42.0	129	3.0	$S < 5\text{Jy}$
S76 E	18 53 47.0/+07 49 26.0	126	2.3	

注: NYO 指尚未被地面站观测过

(c) 主序后星 (Evolved stars) (共 20 颗)

I 源 名	源位置坐标 (1950.0)	流 量 (Jy)	距 离 (Kpc)	附 注
R Crt	10 58 06.0/-18 03 21.0	492	0.29	semi-regular
VY CMa	07 20 54.6/-25 40 11.9	300	0.40	supergiant
RX Boo	14 21 56.6/+25 55 48.0	214	0.46	Mira, $S < 5\text{Jy}$
VX Sgr	18 05 03.5/-22 14 05.9	156	0.50	supergiant
RT Vir	13 00 05.7/+05 27 22.1	132	0.46	semi-regular
R Cas	23 55 53.0/+51 06 36.0	82	0.36	Mira
RR Aql	19 55 00.1/-02 01 33.9	76	0.53	Mira
AM Cep	21 41 28.9/+76 09 27.0	74		
W Eri	04 09 25.7/-25 15 37.0	64	0.55	
U Lyn	06 36 19.2/+59 54 49.0	60	1.02	$S < 5\text{Jy}$
KY Cyg	20 24 06.0/+38 11 17.9	60		
IRC+10365	18 34 59.0/+10 23 00.0	55	0.50	
S Per	02 19 15.1/+58 21 34.0	52	2.40	s-giant, $S < 5\text{Jy}$
R Aql	19 03 57.5/+08 09 10.0	50	0.29	Mira
S Crb	15 19 21.3/+31 32 46.0	43	0.38	$S < 5\text{Jy}$
NML Cyg	20 44 33.8/+39 55 57.0	40	0.50	supergiant
Y Lib	15 09 02.4/-05 49 18.9	39	0.82	
IRC+60169	06 30 00.6/+60 58 50.0	38		
SY Aql	20 04 44.7/+12 48 18.0	37	0.96	
TY Cas	00 34 05.4/+62 51 31.9	35		

5 其它空间 VLBI 计划

• RadioAstron^[28,11,29,30]: RadioAstron 是前苏联在 80 年代中期提出的 SVLBI 计划, 现由俄罗斯莫斯科列别捷夫 (Lebedev) 物理研究所的天文空间中心 ASC(Astro Space Center) 领导, 计划将一个 10m 口径的射电望远镜送上绕地椭圆轨道, 轨道倾角设计为 $51^\circ.5$, 周期是 28h, 近地点和远地点分别是 4000km 和 77000km。设置四个工作频率 (0.32、1.6、5 和 22GHz), 比 VSOP 多了一个 0.32GHz 低频, 对应的系统温度分别为 100、

50、50 和 150K。可记录双偏振观测，但不能作双频的同时观测，VSOP 只能观测左旋圆偏振(LCP)。与地面跟踪站的实时数据传送速率是 $128\text{Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ ，数据的记录格式是 VLBA 或 S2，没有 VSOP 格式。相关处理将在加拿大、俄罗斯、美国和欧洲的处理机上进行。卫星的预计工作寿命是三年，发射时间极可能在 1998—1999 年间。RadioAstron 可以给出高于 VSOP 三倍的空间分辨率，较 GVLBI 高出一个量级，最高空间分辨率可达 $30\mu\text{as}(22\text{GHz})$ ，但成图质量逊于 VSOP。科学目标依其重要性分列如下^[31]：(1) 搜寻 AGN 中的高亮温度源；(2) 高分辨率成图并确定射电源结构大小分布；(3) 用河内水脉泽观测研究星际散射；(4) 测定 AGN 中喷流的自行与红移的关系(即 $\mu-z$ 图)。另外，RadioAstron 研究也可为今后 SVLBI 项目的最优化长基线作初步选择。

RadioAstron 的组织形式类似于 VSOP^[32]，分设 RISC(RadioAstron 国际科学理事会)和 RSOG(Radio Astron 科学操作工作组)等。RISC 由俄罗斯 ASC 的 Kardashev 和加拿大 DRAO 的 Dewdney 共同担任主席。而 RSOG 则由 ASC 的 Popov 领导，统筹安排 RadioAstron 的科学计划进展和操作，包括与 VSOP 的合作等。由于 VSOP 的天体物理学目的是获得高分辨率、高动态范围的图象，所以其轨道的选择是在考虑了好的 $u-v$ 覆盖及较高的空间分辨率后确定的。而 RadioAstron 是追求高的分辨本领，要求基线长度很长，成图质量就不如 VSOP 理想了。RadioAstron 的实施极可能会与 VSOP 有一年左右共同时间，可以考虑进行两者都参与的 SVLBI 观测。但 VSOP 与 RadioAstron 没有相同的数据记录模式。国际项目操作工作组 IMOG(International Mission Operations Group)将负责发展两个 SVLBI(RadioAstron 和 VSOP)同时观测所需的数据交换等事项。解决办法之一是在 RadioAstron 上加入 VSOP 的记录格式。

- QUASAT-IVS-ORT: 关于 QUASAT 的情况见 2.2 节。IVS(International VLBI Satellite)是作为新一代 SVLBI 计划，在借鉴了 QUASAT 的经验基础上于 1989 年向 ESA 提出的又一空间项目^[33]。该项目计划建造一 25m 口径的 SRT，将观测灵敏度提高到 VSOP 和 RadioAstron 的 20 倍(5 GHz 频率上 5 分钟积分可得灵敏度约 1mJy)，从而增加了可观测源的数目。观测频带也大大增多，包括 4.5—8.5 GHz、15—23 GHz、42—63 GHz 和 86—120 GHz，甚至可能到 218—222 GHz。除了进行 VLBI 双偏振观测外，还可以对 O_2 进行单天线的谱线观测。轨道设计成近地点固定(6000 km)，远地点为可变化的(分别为 20000、40000 和大于 150000km 三种)，对应的分辨率是 GVLBI 的 3 倍、5 倍和 20 倍以上，分别用于高动态范围成图、一般成图和模型拟合分析。前两种较低轨道的定位精度大约是 0.1cm，使参考相位观测成为可能。而实时数据传送带宽为 256MHz，卫星设计寿命为 3 年。其主要的科学目标分为两个方面。一是 VLBI 观测方面，将获得较 VSOP 和 RadioAstron 观测大得多的观测样本。具体目标是：通过对河外星系旋臂中 H_2O 脉泽团的统计视差测量决定其距离；通过对巨脉泽的轨道视差测量决定在 10—20 Mpc 范围内的距离；通过对视超光速源的内在自行测量研究宇宙的大尺度结构；通过对引力透镜源的详细成图研究宇宙中暗物质的分布；通过对高红移和低红移源的成图观测研究射电源的演化关系。IVS 分辨率将有可能进入到 $10^9 M_\odot$ 黑洞的史瓦西((Schwarzschild)直径内，有利于研究中央核的能量机制，还有利于研究喷流的加速、传播及其准直性等。射电星中的辐射机制、河外超新星的物理特征和演化、脉泽的放大过程(如大小、形状和动力学过程等)以及分子云等也是 IVS 计划研究的对象。而单天线方面的研究主要是分

子氧的丰度和温度分布。O₂ 是宇宙中第三丰富元素, 在分子云演变成恒星中起着重大作用。另一单天线观测目标是宇宙背景辐射 (CBR) 的康普顿散射, 确定 CBR 的衰减量 (decrement)。但 IVS 计划最终流产了。

ORT (Orbiting Radio Telescope) 是新的 SVLBI 尝试^[34], 业已送交 ESA 作评审。它非常类似未成功的 IVS, 工作频带为 4.5—8.5 GHz、12—23 GHz、42—63 GHz 和 86—120 GHz, 最佳工作频率在 22—43 GHz。6.6 GHz 和 12 GHz 是甲醇观测频率, 而 55—60 GHz 为分子氧和 Sunyaev-Zel'dovich 效应研究所需, 119 GHz 是基态 O₂ 的跃迁频率。射电望远镜设计为 20m 级, 表面精度 (rms 值) 在 43 GHz 为 0.35mm, 指向精度好于 10"。ORT 不要求轨道可变。远地点定在 40000km, 对应于 86GHz 观测分辨率为 10 μ s。ORT 的 60% 观测时间是作 VLBI, 剩余的 40% 为单天线观测时间。灵敏度将是 VSOP 和 RadioAstron 的 20 倍。科学目标同 IVS 大致一样, 希望借助河外水脉泽观测研究哈勃常数 H_0 , 研究 AGN 中喷流的自行与红移关系等, 但增加了对河内甲醇的观测。

- ARISE^[35-39]: 空间和地球之间先进的射电干涉测量 ARISE (The Advanced Radio Interferometry between Space and Earth) 是由 JPL 和 NRAO (也包括了日本 ISAS 和 NAO) 的科学家在 1994 年下半年向 NASA 提出的, 代表着新一代的 SVLBI, 预计的发射时间在 2005 年, 设计寿命为三年。该项目中最关键的技术是如何建造一个费用低、可靠性高、重量轻且精度高的、口径在 20—30m 的可膨胀展开的聚酯薄膜天线, 并且希望利用新技术使得系统温度除了在 86GHz 是 40K 外, 在其它频率上都只有 10K, 实时数据的传输速率为 2—8Gb·s⁻¹, 目的是将灵敏度提高到 VSOP 的 50—200 倍。观测将用双偏振模式, 工作频率为 5GHz、22GHz、43GHz、60GHz 和 86GHz。这些不同频段上的观测有不同的使命, 在 5—43GHz 上, 要求利用其极高的灵敏度, 去观测 VSOP 和 RadioAstron 所不可见之弱源; 而 60GHz 和 86GHz 则作为单天线观测频率。1996 年 5 月, NASA 的 IN-STEP (IN-Space Technology Experiments Program) 或叫 IAE (Inflatable Antenna Experiment) 实验在天空成功地展开了一个 14m 直径的可充气膨胀的反射天线, 其表面精度 (rms 值) 好于 1mm。与此同时也成功地进行了一次叫作 BETSCE (Brilliant Eyes Ten-kelvin Sorption Cooler Experiment) 的试验, 目的是实现低的系统温度。另外, VSOP 和 RadioAstron 之经验将被用来帮助确定 ARISE 的正式轨道, 目前轨道的近地点设计在 5000km, 远地点为 40000km, 轨道倾角约 50°, 周期约为 13.5h, 并考虑放一个或多个 SRT。而卫星上的两个全球定位系统 (GPS) 接收机将保证高精度的轨道定轨, 三维定轨精度在 2 万 km 上是 4cm, 在 5 万 km 上是 10cm, 足够进行水脉泽测量和对弱源的相位参考观测。相位参考观测又进一步提高了对暗弱射电源 (包括瓣主导射电星系、塞弗特星系和几十 Mpc 上的河外脉泽源或是处于宁静态的射电星等) 的成图能力, 提供具有高空间和时间分辨率的图象, 同时也可对核主导源 (如强核源和 BL Lac 天体) 中的低亮温度特征成图。例如, 在 3 万 km 基线上的 43GHz 观测塞弗特星系 NGC1068 可望给出 2000 倍于 HST 分辨率的图象。ARISE 的科学目的主要有三个^[38,39]: (1) 测量较近 AGN 中的能源机制; (2) 利用河外星系水脉泽的自行测量直接定出在 50—200Mpc 范围内的星系距离; (3) 测量银河系内星际分子中氧的丰度和温度分布。另外, 对脉冲星的观测可研究星际散射, 对大样本河外水脉泽观测可帮助定哈勃常数 H_0 , 在 60—70GHz

上用单天线观测 O_2 可研究星际介质中分子氧和 Sunyaev-Zel'dovich 效应。

6 空间 VLBI 未来展望

VLBI 现今已成为获得高空间分辨率的成熟的天文观测技术, 而 SVLBI 可以将该空间分辨率进一步提高。如何继续发挥 SVLBI 卓越的分辨本领优势是未来 SVLBI 发展的一个方向。比较而言, SVLBI 的长波观测对具有陡谱的喷流较敏感, 许多 AGN 从低频到高频都未被 GVLBI 分解, 亮温度的估算也只依赖于基线的长度而非角分辨率, 而且谱线(如水脉泽)的发射频率是固定的。因此, 延伸基线长度依然是提高分辨率的有效手段。

GVLBI 三十多年的发展经历了一个不断提高观测分辨率和灵敏度的过程, SVLBI 的未来发展将与这类似, 将会朝着基线更长、工作频率更高以及 SRT 由一个到两个到多个同时观测的方向发展。灵敏度与分辨率将会同时提高且相互影响, 其发展速度在很大程度上依赖于技术的进步。未来 SVLBI 发展的一个技术重点将是如何降低噪声温度和提高带宽以大大提高灵敏度, 从而可以对弱源成图并检测到更多的射电源(如 IRAS 星系)。

研究表明, 在 10 万公里基线范围上的高动态范围成图要求在太空同时有不止一个 SRT, 从而可兼顾高的分辨率和高的动态范围。近的远地点(12000km)能提供极其出色的孔径综合和高动态范围图象, 而远的远地点(50000km)则提供卓越的分辨率但成图质量会受影响。因而同时利用多个 SRT 能达到既提高空间分辨率又提高成图动态范围的效果。一些预研究显示, 有 2 个 SRT(在远远地点轨道)同时加入的 SVLBI 观测能获得与单个 SRT(在近远地点轨道)观测相当的高质量图象, 且分辨率能提高 2 至 3 倍。

此外, 随着技术的日新月异, 毫米波 SVLBI 也将会到来。高频的观测能给出高的空间分辨率, 进而使得我们甚至能够探索到 γ 射线的产生区域。而偏振观测有利于确定在喷流中的磁场位形。这些信息对构造新的模型或检验已有的吸积盘中喷流形成的模型都将提供客观的依据。

90 年代最激动人心的河外天体物理学成果之一可能要数 CGRO 上四个望远镜之一的 EGRET 在高于 100MeV 能量上, 检测到约 50 颗 AGN 中的 γ 射线辐射^[40]。这些 γ 辐射的变化时标最短的仅有几天, 最长的也就几个月, 这就限制了其发射区域不会超过几个光月的范围。已开展的 GVLBI 观测显示出这类源中有趣的喷流结构以及非常强的毫角秒致密核, 而这更是 SVLBI 高分辨率可以大显身手的地方。

致谢 对 ISAS 的 Phil Edwards 博士提供的帮助表示谢意。

补: 作者完成该文时, 日本又成立了一个叫做 VSOP 2 的工作组^[41], 并已获 ISAS 的科学咨询委员会 SAC(Science Advisory Committee) 批准。该工作组的目的是研究紧接着 HALCA 后的新的 SVLBI 项目的可能性。若新的 SVLBI 计划最终被该咨询委员会接受, ISAS 将负责征集资金和各方面的支持。但任何这样的 SVLBI 卫星发射时间不会早于 2005 年, 即在 ARISE 计划之后。

又: 在 VSOP 卫星(HALCA)发射成功一周年的 1998 年 2 月 12 日, ISAS 发布了征集第 2 次观测建议书通知 AO2(The Second Announcement of Opportunity), 截止期是 1998 年 5 月 8

日, 更详细的资料可在 www 网址 (<http://www.vsop.isas.ac.jp/obs/AO.html>) 或不记名 ftp 地址 (<ftp://ftp.vsop.isas.ac.jp>) 上的目录 (pub/docs/ao) 中查找和下载。

参 考 文 献

- 1 Reichhardt T, Abbott A, Swinbanks D. *Nature*, 1996, 381: 461
- 2 Swinbanks D. *Nature*, 1997, 385: 663
- 3 Burke B F. In: Fanti R, Kellermann K, Setti G eds. IAU Symposium 110: VLBI and Compact Radio Sources. Bologna, Italy, 1983, Dordrecht: Reidel, 1984: 397
- 4 Schilizzi R T. In: Fanti R, Kellermann K, Setti G eds. IAU Symposium 110: VLBI and Compact Radio Sources. Bologna, Italy, 1983, Dordrecht: Reidel, 1984: 407
- 5 Schilizzi R T. In: Reid M J, Moran J M eds. IAU Symposium 129: The Impact of VLBI on Astronomy and Geophysics. Cambridge, USA, 1987, Dordrecht: Kluwer, 1988: 441
- 6 Levy G S *et al.* *Science*, 1986, 234: 187
- 7 Levy G S *et al.* *Ap. J.*, 1988, 336: 1098
- 8 Linfield R P *et al.* *Ap. J.*, 1988, 336: 1105
- 9 Linfield R P *et al.* *Ap. J.*, 1990, 358: 350
- 10 Linfield R P, Burke B F. *Adv. Space Res.*, 1991, 11(2): 411
- 11 Kardashev N S, Slysh V I. In: Reid M J, Moran J M eds. IAU Symposium 129: The Impact of VLBI on Astronomy and Geophysics. Cambridge, USA, 1987, Dordrecht: Kluwer, 1988: 433
- 12 Hirabayashi H. In: Reid M J, Moran J M eds. IAU Symposium 129: The Impact of VLBI on Astronomy and Geophysics. Cambridge, USA, 1987, Dordrecht: Kluwer, 1988: 449
- 13 Hirabayashi H, Edwards P. *VSOP News No.* 55, 1997
- 14 Hirabayashi H, Edwards P. *VSOP News No.* 63, 1997
- 15 Murphy D W. *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1995, 27: 851
- 16 Romney J D. *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1995, 27: 851
- 17 Hirabayashi H, Edwards P. *VSOP News No.* 57, 1997
- 18 Hirabayashi H, Edwards P. *VSOP News No.* 66, 1997
- 19 VSOP Science Operation Group. *Proposer's Guide VSOP*, 1995
- 20 Edwards P. private communication, ISAS, Jun. 1997
- 21 Hirabayashi H. *Adv. Space Res.*, 1991, 11(2): 445
- 22 Hirabayashi H, Edwards P. *VSOP News No.* 23, 1995
- 23 Hirabayashi H. *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1995, 27: 850
- 24 Preston R A. *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1995, 27: 850
- 25 VSOP Science Operation Group. *Announcement of Opportunity*, 1995
- 26 Fomalont E B, Edwards P *et al.* Survey Working Group, private communication, 1996
- 27 Migenes V, Edwards P *et al.* Survey Working Group, private communication, 1996
- 28 Schilizzi R T. In: Weiler K W ed. 18th NRAO Workshop: Radio Astronomy from Space. Green Bank, West Virginia: NRAO, 1986: 153
- 29 Slysh V. *Adv. Space Res.*, 1991, 11(2): 451
- 30 万同山. *天文学进展*, 1992, 10: 201
- 31 Zensus J A. In: URSI National Radio Science Meeting, Washington, DC: USNC/URSI, 1996: 325
- 32 Altunin V I, Kardashev N S, Schilizzi R T. *Adv. Space Res.*, 1991, 11(2): 439
- 33 Schilizzi R T. *Adv. Space Res.*, 1991, 11(2): 453
- 34 Booth R, Schilizzi R. *Space VLBI Work Week at JPL: Future Space VLBI Missions.* private communication, 1994
- 35 Ulvestad J. *Space VLBI Work Week at JPL: Future Space VLBI Missions.* private communication, 1994
- 36 Ulvestad J S *et al.* Proposal to NRA 94-OSS-15, November 1994
- 37 Ulvestad J S, Linfield R P, Smith J G. In: 33rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1995, paper AIAA 95-0824

- 38 Ulvestad J. "Science Goals for Advanced Space VLBI Mission" to Task Group on Space Astronomy and Astrophysics, private communication, 1996
- 39 Linfield R, Ulvestad J. "Status of Inflatable Antenna Technology for ARISE", private communication, 1997
- 40 Mattox J R et al. *Ap. J.*, 1997, 481: 115
- 41 Hirabayashi H, Edwards P. *VSOP News No.* 65, 1997

Progress in Space VLBI Science

Shen Zhiqiang

(Shanghai Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

The progress in space VLBI science during its nearly 30 years history is reviewed with the emphasis on its current status. The brief history of space VLBI is introduced and the difference between space VLBI and ground-based VLBI is discussed. All aspects concerning the VSOP mission and the situation of some other space VLBI projects are described in detail and in brief, respectively. In conclusion, a few words about the future development of space VLBI are said. Two samples of VSOP surveys (one for continuum source and the other for maser source) are provided for reader's reference.

Key words space vehicles—techniques: interferometric—techniques: space VLBI