

空间 VLBI 研究的现状和未来

万 同 山

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

空间 VLBI 卫星 VSOP/HALCA 是日本宇航科学研究所 (ISAS) 的飞行任务 (mission), 已经在 1997 年 2 月升空。它拥有 8m 直径的射电望远镜, 远地点达 22000 km。和地面的射电望远镜联合观测 (干涉观测), 其最高分辨率比地面 VLBI 提高了 3 倍。该项空间 VLBI 观测由 NASA 的地面跟踪站支持。第一批 VLBI 图像已经在因特网上发表。RadioAstron 项目由俄罗斯科学院列别捷夫物理研究所天文空间中心 (ASC) 启动, 除卫星主要由俄罗斯研制外, 其科学仪器有 10 多个国家参加研制。它也用 NASA 的地面跟踪站对卫星进行跟踪。RadioAstron 具有 10m 射电望远镜, 其远地点高度达 70000 km, 最高分辨率可达 $30 \mu\text{as}$ 。其升空时间被安排在俄罗斯的高能卫星 Spectrum X-Gamma 和 Spectrum UV 之后。ARISE 是第二代空间 VLBI 卫星, 正在论证和研制当中。与 VSOP 和 RadioAstron 不同, 其最高频段达 86GHz, 天线直径 25 ~ 30m, 并采用“吸附制冷”新技术, 使总系统温度可达 10~20K, 而且寿命长。预计 ARISE 卫星有可能在 2008 年发射升空。

关键词 空间 VLBI— 航天器 — 仪器: 干涉仪 — 天体物理

分类号: P164

1 引 言

本世纪 30 年代空间射电波的发现第一次告知人们, 宇宙空间还有光学以外的其他的辐射的存在。空间望远镜克服了大气吸收和大气湍流障碍, 使天文学的研究进入到空间天文时代, 也就是全波段天文学时代。由于大气湍流的影响, 地面大型光学望远镜的角分辨率被限制在 $1''$ 左右。事实上, 20 cm 口径的光学望远镜的衍射限就有 $1''$ 的分辨率。空间望远镜有可能达到衍射限, 例如, 哈勃望远镜的分辨率达到 $0''.1$, 已和衍射限十分接近。

和光学观测不同, 射电天文所遇到的问题首先不是大气湍流的影响。由于射电波长比光学波长长百万倍, 单面射电望远镜的分辨率是极低的, 为提高分辨率, 射电天文很早就转向发展干涉测量技术。在 60 年代末, 终于发明了射电甚长基线干涉测量 (VLBI)。现在, VLBI 要进一步提高分辨率, 除了用较短的波长外, 主要是克服地球上的干涉仪基线太短的困难。

空间 VLBI 卫星其实是地面 VLBI 阵的延伸, 其技术和地面 VLBI 一样。因此, 和空间望远镜不同, 空间 VLBI 的观测方式是空间 VLBI 卫星和地面 VLBI 站的联合观测。因此在地面上除了有 VLBI 天线同时观测外, 还要有专门的 VLBI 卫星跟踪站。VLBI 卫星跟踪站的作用是把由氢原子钟控制的定时参考信号发送到卫星, 而卫星把天文信号和时间信息一起发送回来。跟踪站把数据记录在宽带磁带上, 以后的数据处理原理就和地面 VLBI 一样了。

关于空间 VLBI 的讨论早在 70 年代初就开始了。80 年代初以其为科学目标作为 ESA/NASA 联合飞行计划的 QUASAT, 经过了 Phase-A 阶段, 于 1988 年让位于 ESA 的另一个飞行任务。空间 VLBI 的实验验证是 TDRSS(Transfer and Data Relay Satellite System) 实验, 完成于 1986 和 1988 年。这个实验利用了 TDRSS 卫星上的 4.9m 天线与 Usuda(日本) 和 Tidbinbilla(澳大利亚) 的 64m 天线联合观测, 在 2.3GHz 和 15GHz 上测到了干涉条纹。

VSOP 和 RadioAstron 分别于 80 年代的早期和中期提出, 并都进入了实质性的研制阶段。VSOP 于 1997 年 2 月 12 日发射升空。RadioAstron 虽然提出也很早, 一直未停止工作, 但目前的升空时间仍未确定, 可能在 1999 年以后。

VSOP 和 RadioAstron 的天线和地面 VLBI 天线比较起来, 灵敏度低了太多, 只能观测最强的源。ARISE 是第二代的空 VLBI 飞行任务 (mission), 它和地面 VLBI 天线一样灵敏, 已被列入 NASA 的“宇宙结构和演化” SEUS(Structure and Evolution of the Universe) 规划的“指南”(SEUS Roadmap), 是 2000~2020 期间 6 大飞行任务之一, 预计在 2008 年可能发射升空。VSOP, RadioAstron 和 ARISE 的主要飞行参数 (设计值) 列表如下:

表 1 VSOP, RadioAstron 和 ARISE 飞行任务的主要参数 (设计值)

飞行名称	VSOP	RadioAstron	ARISE
发射日期	1997-02-12	约 2000 年	约 2008 年
寿命	3yr	3~5yr	5yr
近地点	1000 km	2000 ~ 4000 km	5000 km
远地点	22 000 km	约 70 000 km	约 40 000 km
轨道倾角	31°	51°.5	60°
轨道周期	6.6h	28 h	约 13.5 h
仪器舱重量	820 kg	1500 kg	1000 ~ 1500 kg
天线口径	8m	10m	25m
天线形式	网状	散开型	膨胀型
数据率	128Mbit/s	128 Mbit/s	8 Gbit / s
偏振	左圆偏振	双偏振	双偏振
观测频段 /GHz	1.6-4.9-22	0.3-1.6-4.9-22	4.9-22-43-60-86
孔径效率	0.4-0.55-0.41	0.5-0.5-0.5-0.3	0.6-0.55-0.4-0.2-0.1
系统温度 /K	100-120-200	100-50-50-150	8-10-20-40-40
灵敏度 /mJy (和 25m 天线干涉)	90-110-450	170-20-23-93	1-2-9-NA-90
最高分辨率	约 1mas	30 μ as	10 μ as

注: RadioAstron 的灵敏度是指和 70m 地面天线联合 (干涉) 观测的灵敏度, 而 VSOP 和 ARISE 的灵敏度是指和 25m 地面天线联合观测的。由于 VSOP 升空后的 22GHz 实际系统温度达 1500K, 而且天线效率也很低, 科学

研究的作用有限, 而 VSOP 在 6cm 的分辨率应为毫角秒量级。

2 空间 VLBI 观测的地面支持

2.1 轨道 VLBI 跟踪站 (NRAO Green Bank)^[20]

空间 VLBI 的观测方式是空间 VLBI 天线和地面 VLBI 天线组成干涉仪的联合观测。因此在地面上除了有 VLBI 天线同时观测外, 还要有专门的 VLBI 卫星跟踪站。

以 NRAO Green Bank VLBI 跟踪站为例, 它是 NASA 的 4 个跟踪站之一, 拥有一面 14m 天线专用于跟踪空间 VLBI 卫星, 于 1995 年改造完成。Green Bank 跟踪站每 5 min 刷新跟踪站的工作情况报告, 以 ASCII 码的形式显示目前的天线指向、工作情况和宽带数据记录情况。定期作出 VSOP/HALCA 下行数据的自相关谱, 每 10 min 一次。跟踪站显示和卫星联系的稳定度, 用图形表示预报和实测的下行联系频率的差, 以表征轨道预报的质量。

1997-03-21 跟踪站首次锁定到 VSOP/HALCA 的 Ku 频段的下行联系, 随后 VSOP/HALCA 和 VLBA 进行了联合观测, 并得到了耀变体 (blazar) 1156+295 的图像。

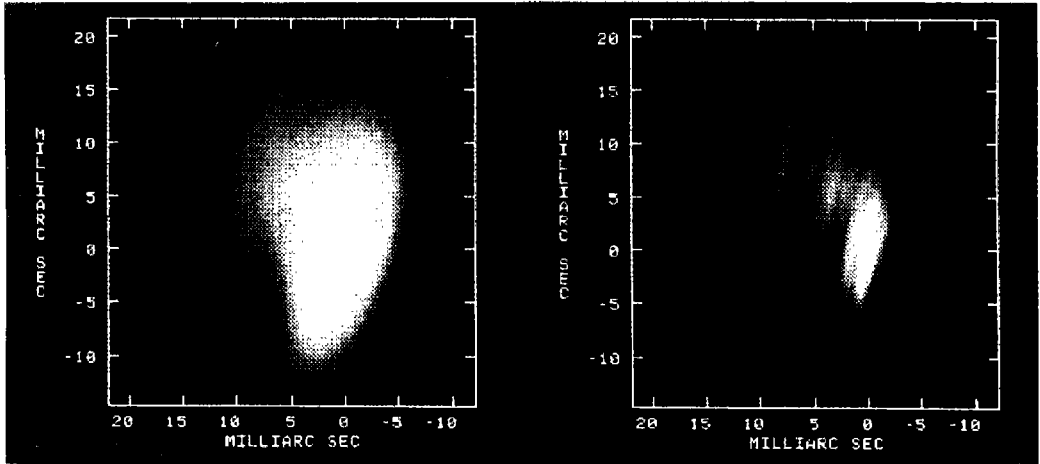


图 1 耀变体 1156+295 的 VLBI 图像^[21]

左图是 VLBA 单独观测的图像, 右图是 VSOP/HALCA + VLBA 的图像。可以看出, 加了 VSOP/HALCA 的数据的右图的分辨率已大有提高。图示从该源的中心喷射出高能粒子喷流,

在右图中已可辨认出许多细节。

2.2 喷气推进实验室 (JPL) 空间 VLBI 计划^[22]

JPL 空间 VLBI 计划由 NASA 资助, 它主要支持与 VSOP 和 RadioAstron 有关的美国跟踪站的工作, 协调和 NRAO 的科学活动。JPL 空间 VLBI 计划负责 NASA 的 3 个深空跟踪站、VSOP 和 RadioAstron 所有数据界面的研制, 保证这些界面的有效传递, 使 VLBI 相关处理机成功运行所需的所有数据, 实施和操作一个保证及时传送所需跟踪数据的数据传输系统。JPL 空间 VLBI 计划的工作还包括研制和利用模拟软件、飞行的科学安排、研制所有的国际部件的公共界面、飞行的日常操作。

3 VSOP^[1~6]

3.1 概 况

VSOP(VLBI Space Observatory Programme) 计划由日本宇宙科学研究所 (ISAS, Institute of Space and Astronautical Science) 和日本国立天文台合作领导。VSOP 于 1997/02/12 在 Kagoshima 飞行中心用 ISAS M-V 火箭发射成功。在发射后, 该卫星随即改名为 HALCA(Highly Advanced Laboratory for Communications and Astronomy), 是日语“Haruka”(遥远)的谐音。其 8m 射电望远镜于 1997-02-27~28 在轨道上成功地打开。其椭圆轨道的远地点 21000km, 近地点 560km, 其最长的基线是地球上所能达到的 3 倍。观测频段是 1.6GHz(18cm), 5GHz(6cm) 和 22GHz(1.3cm)。

VSOP 的 VLBI 跟踪站地面支持除了日本的 Usuda 10m 天线外, 还和美国的 NRAO Green Bank 14m 天线跟踪站、NASA 的 Goldstone、Tidbinbilla 和 Madrid 跟踪站有合作关系。

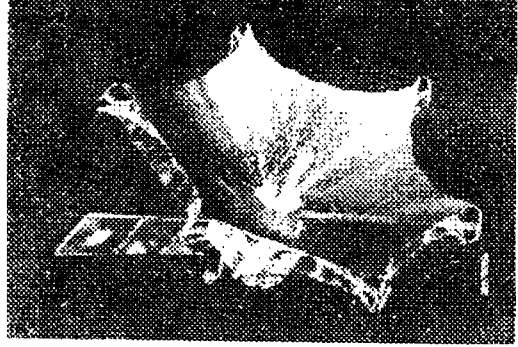


图 2 空间 VLBI 卫星 VSOP/HALCA^[21]

3.2 重点观测项目

VSOP 科学观测的主要部分是重点科学项目 (KSP, Key Science Programs)。观测由提案小组和飞行任务执行人员 (mission personnel) 合作实施。大约有一半的 VSOP 观测时间分配给这些项目。经 VSOP 的科学评议委员会推荐, VSOP 国际学术委员会批准的 KSP 包括: 耀变体、高亮温度 / 日内变化性、喷流的运动 (3C 273, 3C 279, 3C 345)、重点源 (NGC 4258, 人马座 A 和室女座 A)、脉泽斑和巨型脉泽。

3.3 普查项目

普查 (survey) 观测项目属 VSOP 飞行任务 (mission) 领导, 通过普查工作组 (SWG) 来实施。SWG 确定并执行活动星系核和脉泽源的普查, 以便测定各类射电源的总体性能 (如亮温度)。普查的结果对于计划未来的 VLBI 观测是重要的 (也包括 VSOP 本身)。参加这项普查的地面射电望远镜不多。

3.3.1 VSOP 连续谱 HALCA 普查星表^[21]

1996 年 VLBA 观测了为 VSOP 所准备的一个星表中的所有的源, 频率 5GHz, 纬度 -43° 以北, 以便确定哪些源是未充分分解的, 值得由 VSOP 来观测。在实际的 VSOP 观测中, 只有那些在 7000 km 基线上 (VLBA 的 Mauna Kea 和 Saint Croix) 相关流量大于 0.4Jy 的源才能入选。这形成了 VSOP 连续谱 HALCA 普查星表。该星表可见于网页。

3.3.2 脉泽普查星表^[21]

脉泽普查原定的科学目的是导出脉泽斑的亮温度用于研究特征的结构。通过对脉泽斑的统计研究, 可以研究脉泽的物理性质和星际介质散射; 研究斑分布和亮温度的时变, 这些和它们介质的运动学和动力学特征相联系; OH 脉泽在恒星形成区的分布和演化中的恒星的星周包层的结构和动力学。脉泽源普查的源分成 3 组: (1) 低质量原恒星, (2) 大质量恒星形

成区, (3) 主序后星。目前的计划是大约观测 40 个源, 研究其脉泽斑的大小和形状, 以及亮温度分布。对每源做 2 次观测, 以研究其变化性。

3.3.3 偏振观测

HALCA 仅能接收左旋圆偏振 (LCP)。由于它的馈源不能像大多数地面射电望远镜的馈源那样能相对于源方向而旋转, 且不能把卫星天线转向校准源, 使偏振不纯度的校准复杂化。但由于地面的射电望远镜都是双偏振的, VSOP 仍有可能做偏振强度成图, 但这尚有待进一步研究。

3.4 第一批干涉条纹

VSOP 的第一批干涉条纹于 1997-05-07 用 Usuda 64m 和 Kashima 34m 天线得到, 观测源为 PKS1519-237, 频率 1.6GHz。其数据由卫星传送到 Usuda 10m 天线跟踪站。数据用 VSOPT 格式记录, 用 Mitaka 相关器做相关处理。不过直到 1998-03-22 才得到频率 22GHz 上的第一批干涉条纹。这些条纹的数据是由 Goldstone 跟踪站接收的。观测中使用 HALCA 和 VLBA 天线, 观测源是 Orion-KL 中的水脉泽爆, 用 VLBA 相关器做相关处理。在谱线范围内的相关流量峰值在 70 000 Jy 到 470 000 Jy, HALCA 按有效面积 0.1m^2 、系统温度 1500 K 校准。观测结果中也看到了谱线的第二特征, 从主线红移 $3.5\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 其强度是主线的 7%。

3.5 第一批 VSOP 的 VLBI 图像简报

第一批的 VSOP VLBI 图像已见于因特网^[23], 简述如下:

- EGRET γ -射线耀变体 1633+382(6cm 波段)

观测于 1997-07-29 完成, 是 VSOP 的轨道检测, 也是部分科学项目。所用天线是 HALCA 和 VLBA 的全部天线, 最长基线约为 $2.5 \times 10^8 \lambda$, 是 VSOP 所能达到的最长基线的 1/2, 但仍能分辨一个近核的喷流。此源的红移 $z = 1.307$, 是最亮的 γ 射线耀变体。

- 3C446(6cm 波段)

观测于 1997-12-02 完成, 参加观测的天线是 HALCA, Ceduna(澳大利亚), Mopra(澳大利亚), 上海(中国), Usuda(日本), Hartebeesthoek(南非)。

- PKS J2207-5346

类星体, 红移 1.2。作为 VSOP 的 AGN 普查的一部分于 1997-10-30 观测。观测天线是 HALCA 和 Hartebeesthoek + Hobart。虽然 (u,v) 覆盖较差, 但图像的信噪比很好, 更重要的是源的核分解了, 首次测得了亮温度。

- 1413+135(6cm 波段)^[24]

这是一个引人注目的源: (1) 该源在 3.6cm(X 波段) 比在 13cm(S 波段) 的变化剧烈 18 倍, (2) 是 CO, HCN 和其他分子的射电吸收线已被测得的 5 个源之一, (3) 是一个年轻的射电源。图像的分辨率比单独用 VLBA 高 3 倍。

- BL-Lac 天体 Mrk501(18cm 波段)

1997-08-04 观测, 参加观测天线: HALCA(8m), Goldstone(70m), VLBA(每个 25m)。

- 1928+738(6cm 波段)

类星体, 1997-08-22 观测。参加天线: HALCA, Effelsberg, Torun 和 VLBA。

- PKS 1519-273(6cm 波段)

活动星系, 此源曾用 VLBI 10 个望远镜加 VLA 相阵观测过。这次再加上 HALCA 进行了观测, 是用轨道射电卫星所获得的第一张空间 VLBI 图像。

4 RadioAstron

4.1 概 况

RadioAstron 项目由俄罗斯科学院列别捷夫物理研究所天文空间中心 (ASC) 启动, 并发展成了广泛的国际合作项目。有 10 多个国家参加了研制仪器、规划飞行参数、以及地面支持。俄罗斯提供卫星和大部分的飞船硬件, 科学仪器舱中的 92cm 接收机由印度和俄罗斯研制, 18cm 接收机由澳大利亚 (CSIRO) 研制, 6cm 接收机由欧洲 VLBI 组织研制, 1.35cm 接收机由芬兰赫尔辛基技术大学研制, 卫星载铷钟和氢原子钟在瑞士研制。由加拿大空间局提供 RadioAstron 的记录、回放和相关设备。由 NRAO 提供 VLBA 记录终端, 并用 VLBA 相关处理器做相关处理。

4.2 科学目的

以前所未有的、接近于大质量黑洞的吸积盘尺度的分辨率来研究射电星系和类星体。这样的分辨率同时也可: 通过测量视差和自行来测定脉冲星和其他致密星系的距离; 检测脉冲星附近发射出的相对论性粒子的包层; 研究恒星形成区中脉泽的结构和动力学; 通过致密射电源的闪烁研究星际介质的漩涡结构; 研究致密河外射电源的宇宙演化; 测定宇宙基本参数和暗物质性质。

4.3 地面跟踪站

除了一个跟踪站 (依尔库茨克 32m 天线) 在俄罗斯外, 还有 4 个 NASA 提供的跟踪站: Goldstone、Green Bank、Madrid 和 Canberra。卫星在进行 VLBI 观测的时候, 必需和其中的一个跟踪站相联系。

4.4 地面射电望远镜

由于 RadioAstron 的 10 m 天线的灵敏度低而且轨道很长, 必需依靠地面上的大型射电望远镜。不过在 16GHz 和 5GHz 利用中等长度的基线观测时也可以用 25m 地面天线。

4.5 计划进度

RadioAstron 卫星属于俄罗斯 Spectrum 飞船系列, 其升空时间被安排在高能卫星 Spectrum X-Gamma 和 Spectrum UV 之后, 飞船的运载舱由 Lavochkin 公司制造。

目前正在和 NASA 的地面跟踪站协商操作分工和界面, 以及测试俄罗斯飞船和美国跟踪站的兼容性问题。发射升空的时间应在 1999 年以后。

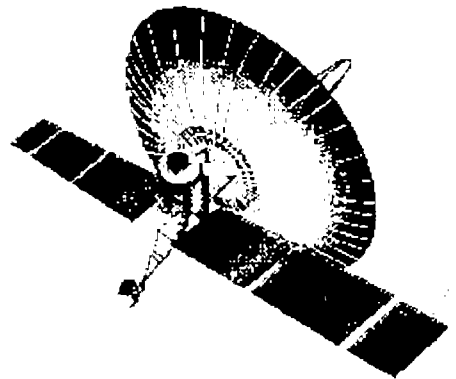


图 3 RadioAstron 示意图^[25]

5 ARISE^[7~14]

5.1 概 况

ARISE(Advanced Radio Interferometry between Space and Earth, 天地间高级射电干涉测量)的基本考虑是在轨道上有1~2个和VLBA同等的天线,把VLBA的基线伸向空间,

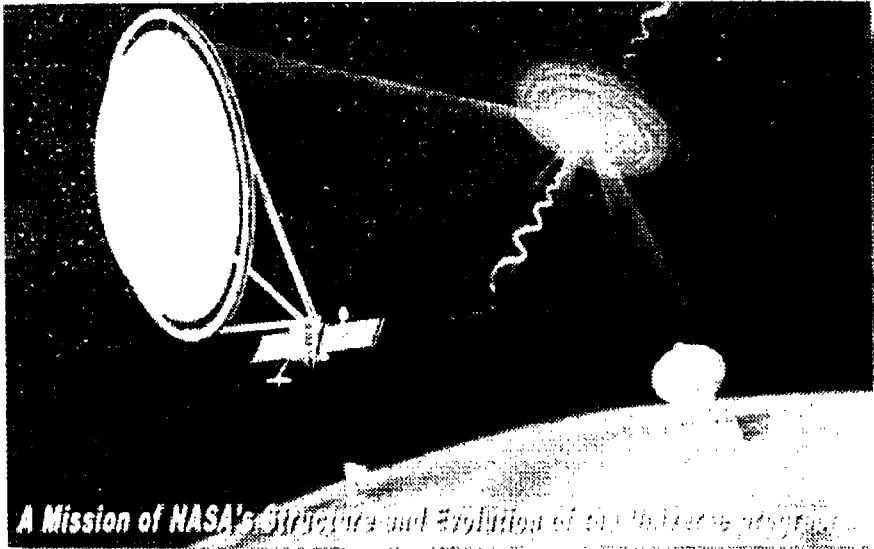


图4 ARISE(左)和地面射电望远镜联合观测黑洞的想像图^[26]

以获得很长的基线。目前ARISE已被接受,并进入到了飞行任务的工程和科学比较研究阶段。其工作频段范围是5~86GHz,地面-空间干涉仪灵敏度比VSOP和RadioAstron在同样的频段上高出约200倍。主要是用了25m望远镜,总的系统温度在10~20K量级,数据率2~8Gbit/s。1996年,已用航天飞机做了14m膨胀型天线和表面精度的试验。预计2008年发射升空是可能的。ARISE将可获得宇宙中最高分辨率为 $15\mu\text{s}$ 的极端高能的天文现象的图像,诸如 γ 射线耀变体的最内层的相对论性喷流,与河 H_2O 巨型脉泽相关的物理学。

5.2 科学目的

ARISE飞行任务的科学目的描述已有多次^[7,11~14],这里仅着重叙述其主要研究领域。

5.2.1 活动星系核(AGN)

ARISE可提供 $15\mu\text{s}$ 分辨率的活动星系核的核心的图像,这对研究黑洞的吸积盘的内部和AGN有联系的喷流会有新进展。在最近的射电星系(半人马座A), $15\mu\text{s}$ 对应于源上不到1光日的距离,而哈勃望远镜可达的分辨率是对应于几光年。在宇宙远处(约 10^{10} 光年)的类星体,ARISE的分辨率对应于几光月,在哈勃望远镜对应于1000光年。在空间-地面VLBI基线的高分辨率下观测得到射电源的相关流量将下降,但轨道天线不像地面天线受到地球上噪声的影响,它比地面上同样大小的天线灵敏度更高,从而补偿了相关流量的下降。

γ 射线耀变体是剧变的AGN,是ARISE的首选观测目标。已有40个以上的的这种天体被康普顿伽马射线天文台的EGRET所发现^[15]。这些天体中的 γ 射线来自它们的相对论

性喷流的内部, 可能是吸积盘光子的康普顿散射。γ 射线和射电的功率比, 结合 VLBI 分量的视速度, 可以成为源和喷流加速的物理性质的约束条件^[16]。这要求 ARISE 在高于 20GHz 的频率上提供高分辨率, 在这个频率以上, 内部喷流是光学薄的。

5.2.2 H₂O 巨型脉泽 (Megamaser)

许多邻近 AGN 的 H₂O 巨型脉泽频率是 22.2GHz, 其各向同性亮度比典型的星系恒星形成区高出百万倍。在邻近活动星系 NGC 4258 中, 脉泽斑的径向和角运动的测量可以用来作出盘的几何图像, 同时也提供脉泽内部质量精确测量, 其质量是太阳的 3.5×10^7 倍^[17]。此外, 视线方向上的视加速度和角自行可以用来导出星系的精确几何距离, 相对误差 4%^[18]。

但是, 对于更远的 H₂O 巨型脉泽所对应的角尺度就小了, 这要求更高的分辨率, 以便分开成团的辐射并精密测量脉泽斑的运动。由于脉泽辐射是在固定的频率上, 空间 VLBI 是唯一的方法。同时, 在长的基线上高信噪比的干涉检测要求高灵敏的天线。这样, 用 ARISE 可能获得足够遥远的巨型脉泽的图像, 在那里, 星系的径向速度主要是宇宙膨胀所致(所谓“哈勃流”)。直接的距离测量可以提供宇宙尺度(哈勃常数)的测量, 精度达 10%。

5.2.3 其他

VLBI 引力透镜源可以用更高的分辨率成图, 以提供这些透镜天体中的暗物质的分布情况。在银河系中, 可以测到多种射电星并成图, 即使它们处于静态也行。主序后星附近的脉泽区也可以成图。ARISE 可以对弱致密核的 AGN 的核心成图, 例如赛弗特星系和瓣优势射电星系。ARISE 还有单天线观测能力, 即在 60GHz 可以对银河系中的恒星形成区的密度和温度分布成图。

5.3 关键性技术

ARISE 的最关键性技术是轻重量的、20~30m 直径的高精度膨胀型天线。各种尺寸天线的地面模型测试工作得到其直径和表面 rms 之比大约是 1000~4000。在目前的技术条件下, 25m 天线的 rms 就是 1 cm, 必须大大提高。例如新墨西哥的 phillips 实验室的 25m 膨胀型地面原型有望于 1999 年有结果, 预期表面精度 2mm(rms)。膨胀型天线的表面误差可以部分地用电子和机械的方法加以补偿, 正在研究中的是馈源阵和副面成型方法。这种天线的包装容积为等同的机械结构容积的 $\frac{1}{100}$, 同时重量是等同结构的 $\frac{1}{5}$, 造价为其 $\frac{1}{6}$ 。该天线的反射面结构将在 $\frac{1}{10000}$ 大气压下工作。经过大量研究, 决定采用离轴(off-axis)结构, 以保证较高的科学性能并使飞船的其余部分的设计简化。经论证, 决定用格雷高里(Gregorian)高轴式, 其结构和副面比卡塞格林式的尺寸小而简单, 副面还可用机械成型加工, 以进一步提高天线的性能。ARISE 要求天线的表面精度是 0.5~1mm(rms), 以满足工作在 43GHz 和 86GHz 的需要。这种技术将取自 NASA 空间膨胀结构计划(Space Inflatables Programs)的研究成果。至于重量, VSOP/HALCA 的 8 m 天线是 250 kg, 换算到 25 m 天线就是 2500 kg, 是运载火箭不能承受的。必需采用新技术。所幸这是多用途技术, 它也是地球传感辐射计、空间通信和太阳能装置所需要的。从技术进展情况看, 有可能造出轻于 300 kg 的 25 m 膨胀型天线, 而飞船的重量可控制在 1700 kg 左右, 使运载火箭可以承受。

另一项提高射电望远镜灵敏度的关键技术是使总系统温度达到 10~20K, 这项试验叫做 BETSCE(Brilliant Eyes Ten-Kelvin Sorption Cryocooler Experiment)。在这种新技术以前, 在空间要达到 10K 就必需在飞船上放置大而笨重且寿命短的杜瓦瓶, 内灌液态氮或固体氢。新技术可以达到 10yr 以上的寿命, 无震动, 将可用于未来的红外物理飞行(例如 NGST)和空间

VLBI。BETSCE 所用的氢吸附制冷器 (hydrogen sorption coolers) 工作原理是利用特制的金属合金粉、金属氢化物通过可逆的化学反应吸收氢制冷剂。在吸附压缩机中, 金属氢化物先是被加热使氢加压, 而后冷却到室温以减压。连续地加热和制冷金属合金粉, 氢通过制冷周期而被循环。在压缩机最冷的时候使压缩氢膨胀以实现 10K 的低温。膨胀实质上是使氢冷冻以产生 10K 的固体冰立方体。然后被冷却的设备产生的热负载使冰升华。此闭合周期一直重复下去。氢吸附制冷器具有高性能, 长寿命, 低功耗和无影响高精度天线指向的机械振动等优点。

由于上述两项新技术并不是专用于 ARISE 的, 这使得 ARISE 的造价不会太高。

5.4 空间 - 地面 VLBI 观测系统

利用相位基准 (phase referencing) 的高精度定位方法以观测弱源要求在离开目标源约 1° 的校准源和目标源之间在数十秒内来回观测。因此为了测出 mJy 强度的源, 要求飞船和地面望远镜的观测带宽都达到约 2GHz。这要求实时的空间 - 地面通信联系和数据记录的速率至少达到 $4 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$, 最好 $8 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$, 而地面的相关处理机处理的时间不比观测时间长。这样, ARISE 的总体要求如表 2 所示:

表 2 ARISE 飞行任务的总体要求

项目	要求	理由
天线直径	25 m	mJy 灵敏度
天线精度 (校准后)	0.2 ~ 0.3 mm	在 86 GHz 上 $\lambda/16$
天线指向	$< 3''$	在 86 GHz 上损耗 $\leq 3\%$
系统温度	10K ~ 40K	mJy 灵敏度
数据率	$\approx 8 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$	mJy 灵敏度
VLBI 频率	5 ~ 8,22,43,86 GHz	标准 VLBI 频段
单天线频率	60 GHz	观测恒星形成区的 O_2
远地点高度	$\approx 40000\text{km}$	15 ~ 100 μas 的分辨率
寿命	3 yr	射电源监测
总重量	$\leq 1700\text{kg}$	运载火箭可以承受的重量

表 3 VSOP 和 ARISE 与 VLBA 天线联合观测的的 22GHz 灵敏度比较

参数	VSOP(1997)	ARISE(2008)	灵敏度比
直径	8 m	30 m	3.7
天线效率	40%	60%	1.5
系统温度	200 K	10K	4.5
数据率	128 Mbit/s	8 Gbit/s	8.0
总提高: 谱线			约 25
总提高: 连续谱			约 200

注: 总提高是各项灵敏度比的乘积。

5.5 ARISE 和 VSOP、RadioAstron 的比较

ARISE 的灵敏度比 VSOP 提高了 2 个量级以上。表 3 是在相同的频率 22GHz(是 VSOP 也是 RadioAstron 的最高频率)上的灵敏度比较。由于 VSOP 和 RadioAstron 处于同一个技术水平,表中只给出 ARISE 和 VSOP 的比较。对于谱线,增加总观测带宽并不提高灵敏度,灵敏度的提高只和天线直径和总系统温度有关。

由表 3 可见, ARISE 的灵敏度有大幅度的提高。在观测分辨率方面,由于 ARISE 的频率达 43GHz(和 86GHz),虽然其远地点高度小于 RadioAstron,分辨率仍高许多(见表 1),但因为 (u,v) 覆盖比 RadioAstron 好很多,因而成图的质量可以得到保证。

顺便提一下, RadioAstron 强调分辨率是以牺牲图像质量为代价的,但这也正是它的特色。RadioAstron 的分辨率比地面 VLBI 大约高出 10 倍。有望以前所未有的、接近于大质量黑洞的吸积盘尺度的分辨率研究射电星系和类星体。无论是 VSOP, 还是 RadioAstron, 都开创了新的研究领域,且有相互补充作用。但由于技术的不足,例如, VSOP 的 22GHz 目前所测定的系统温度是 1500K, 大大低于预期值。这对实现预定的科学目标具有相当大影响。

5.6 计划进度

ARISE 已列入 NASA 的“宇宙的结构和演化”项目的发展指南。目前尚处于飞行任务的工程和科学比较研究阶段。1998 年 8 月的“ARISE 科学专题讨论会”集中讨论了其重点科学研究领域,即 γ 射线耀变体, AGN 的高频偏振 VLBI, H_2O 巨型脉泽和脉泽。ARISE 已被列入“宇宙的结构和演化”项目(2000~2020)的 6 大飞行计划之一;可望在 2008 年发射升空。

6 结 束 语

空间 VLBI 的复杂性在于比其他的空间望远镜更加需要广泛的国际合作。VSOP 和 RadioAstron 是差不多同时提出的,但进度不同。VSOP 在 22GHz 频段的接收遇到了困难,在升空 1 yr 后才通过对最强源的观测检测到干涉条纹,这样大部分观测将用 1.6GHz 和 4.9GHz 这两个频段来完成。虽然如此, VSOP 仍显示了空间 VLBI 的强大生命力:由于投影基线的变化远比地面 VLBI 阵迅速,因而可以快速成图,使研究 1d 以内的射电源快速变化成为可能;南北分辨率比地面 VLBI 大大地提高了;由于 VLBI 卫星的轨道运动,空间 VLBI 的 (u,v) 平面比地面 VLBI 的充满得多,提高了图像的动态范围。这无疑使 VLBI 研究推进了一大步。

RadioAstron 的分辨率极高,比地面 VLBI 高一个量级。用前所未有的、接近于大质量黑洞的吸积盘尺度的分辨率来研究射电星系和类星体,是一大特色。这提供了发现新现象的可能性,虽然图像的动态范围会比 VSOP 低。不过,在其他的观测能力方面, VSOP 和 RadioAstron 是同一技术水平的空间 VLBI。

ARISE 是新一代的空间 VLBI。其灵敏度提高了 2 个量级。轨道的远地点可达 40 000 km,也可能在 20 000 和 50 000km 之间选取,所以分辨率约为 $15\mu\text{as}$ 。由于迄今地面 VLBI 的绝大部分观测是在厘米波段, ARISE 的分辨率比地面 VLBI 大约提高了 2 个量级。至于成图能力, 1988 年在论证 QUASAT 时已作了大量的研究^[19], 应比较成熟了。总的来说, ARISE 的科学作用将是很有吸引力的。

参 考 文 献

- 1 Hirosawa H *et al.* In : Proceedings of the 21st International Symposium on Space Technology and Science, paper ISTS 98-j-03(1998)
- 2 Hirabayashi H. Springer Science, 1996, 2(11); 6
- 3 Hirabayashi H. In: Ekers R, Fanti C, Padrielli L eds. Extragalactic Radio Source, IAU Symposium 175, Bologna, Italy, 1995, [s.l.]: [s.n.], 1996, 529
- 4 Murphy D W. In: Ekers R, Fanti C, Padrielli L eds. Extragalactic Radio Source, IAU Symposium 175, Bologna, Italy, 1995, [s.l.]: [s.n.], 1996, 530
- 5 Edwards P. In: Ring E A ed. Proceedings of the 4th Asia-Pacific Telescope workshop, 1996, 188
- 6 Hirabayashi H, Hirosawa H, Kobayashi H *et al.* Science, submitted (1998)
- 7 Ulvestad J S. to be published in Advances in Space Research, 32nd COSPAR Scientific Assembly, 1998
- 8 Gurvits L I, Ulvestad J S, Linfield R P. In: van't Klooster C G M ed. Large Antennas in Radio Astronomy, Noordwijk, The Netherlands : ESTEC, 1996, 81
- 9 Herrnstein J R. In: Carilli C, Radford S, Menten K *et al* eds. Highly Redshifted Radio Lines, San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, in press (1998)
- 10 Levy G S, Linfield R P, Ulvestad J S *et al.* Science, 1986, 234: 187
- 11 Ulvestad J S. In: Taylor G B, Carilli C L, Perley R L eds. Synthesis Imaging in Radio Astronomy II, San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 1998
- 12 Ulvestad J S, Gurvits L I, Linfield R P. In: Jackson N, Davis R eds. High Sensitivity Radio Astronomy, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997 252
- 13 Ulvestad J S, Linfield R P. In: Zensus J A, Taylor G B, Wrobel J M eds. Radio Emission from Galactic and Extragalactic Compact Sources, IAU Colloquium 164, Socorro, NW, USA, 1997, San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 1998, 397
- 14 Ulvestad J S, Linfield R P, Smith J G. 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA Paper 95-0824 Reno, NV, 1995
- 15 Mukherjee R, Bertsch D L, Bloom S D *et al.* Ap. J., 1997, 490: 116
- 16 Marshcher A P. Proceedings of the National Academy of Science, 1995, 92: 11439
- 17 Moran J M, Greenhill L J, Herrnstein J R *et al.* Proceedings of the National Academy of Science, 1995, 92: 11427
- 18 Herrnstein J R. In: Carilli C, Radford S, Menten K *et al* eds. Highly Redshifted Radio Lines, San Francisco, CA: Astronomical Society of Science of the Pacific, (1998), in press
- 19 Schilizzi R T. In: Reid M J, Moran J M eds. The Impact of VLBI on Astrophysics and Geophysics, IAU Symposium No. 129, Cambridge, USA, 1987, Dordrecht: Kluwer, 1988: 441
- 20 Website: <http://info.gb.nrao.edu/> E-mail: tminter@nrao.edu, Last update: 10/29/98
- 21 Website: <http://www.vsop.isas.ac.jp/> E-mail: vsop_www@vsop.isas.ac.jp, Last update: 11/18/98
- 22 Website: <http://sgra.jpl.nasa.gov/> Fax: +1-818-393-0042, Last update: 01/29/99
- 23 Website: <http://www.vsop.isas.ac.jp/general/Images.html/> http://sgra.jpl.nasa.gov/PR_images/
- 24 Website: http://www.gb.nrao.edu/~glangsto/1413/Glen_Langston, Last update: 02/11/98
- 25 Website: <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/index.htm> E-mail: yakimov@asc.rssi.ru, Last update: 04/06/99
- 26 Website: [http://www.nrao.edu/\(OVLBI\)](http://www.nrao.edu/(OVLBI)) E-mail: webmaster@nrao.edu, Last update: 03/09/98

The Present and Future of Space VLBI

Wan Tongshan

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

Abstract

The VSOP (VLBI Space Observatory Programme) mission is led by the Institute of Space and Astronautical science, in collaboration with the National Observatory of Japan. It was launched on February 12, 1997. The VSOP satellite, renamed HALCA after its successful launch, carries a radio telescope with 8m in diameter, and moves in an elliptical Earth orbit, with an apogee height of 21 000 km. The resolution is three times better than that with ground VLBI array. The Space VLBI is supported by NASA ground tracking stations. First images have been shown on Internet.

The RadioAstron program was initiated by Astro Space Center (ASC) of Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, and has expanded into a broad international collaboration. RadioAstron will be supported by NASA tracking stations also. It has a 10 m radio telescope, and its orbit has an apogee height about 70 000km, providing an angular resolution as high as 30 microarcsecond. Particular scientific goal of the mission is the study of radio galaxies and quasar with unprecedented angular resolution approaching angular size of accretion discs around massive black holes. The launch of the mission is scheduled after the high energy satellites Spectrum X-Gamma and Spectrum UV. ARISE is a next-generation space VLBI satellite under development. The differences between ARISE and VSOP-RadioAstron are: the operating frequency as high as 86GHz, antenna diameter 25~30 meter, new technology "sorpton cooler" permitting system temperature on the order of 10~20 K with long lifetime. This enables investigation on the nature of the innermost relativistic jets in γ ray blazars, and the physics associated with extragalactic H₂O megamaser. The launch of the satellite will probably be in 2008.

Key words space VLBI—space vehicles—instrumentation: interferometers—Astrophysics