

# 空间 VLBI 站和地面 VLBI 阵联测——下一代的 VLBI

万 同 山

(中国科学院上海天文台)

## 提 要

本文从两个方面评述空间 VLBI 研究。第一部分是科学目标论证, RADIOASTRON 受灵敏度所限但基线比地面长 10 倍, 其基本问题是何类射电源能被观测到, 用何方式观测, 即检测到, 做成图, 监测或天体测量。IVS 是第二代空间 VLBI 站, 它的科学目标分宇宙学、类星体和星系、恒星、分子云等, 我们着重于描述从地面 VLBI 结果分析而提出有待于解决的问题。第二部分主要介绍技术研究, 提到基本原理, 灵敏度和分辨率, 轨道和成图能力研究等, 最后提到空间 VLBI 的使用。预期今后 10 年, 将会形成从事空间 VLBI 研究的队伍。

## 一、引 言

VLBI 的发展已经历 25 年了, 我们在文献[1]中已提到, 空间 VLBI 在 90 年代将会得到发展。目前地面 VLBI 的观测能力恐再难以提供突出的新发现, 特别是有许多的射电源结构用地面上最长基线已无法分解。迄今为止的 VLBI 观测成果正在分析研究并提出了一系列的新问题。例如, 在河外射电源中 VLBI 虽然能得到小至 0.1pc 的结构图像, 但要了解喷流初始的现象则至少要把分辨率再提高 2—3 个量级。利用相位基准法(phase referencing)定位精度已达数十微角秒, 但在所观测到的喷流节点运动的短距离上, 定位精度尚不足以精确确定出其速度和方向的变化。换句话说, 在对第一代的河外射电源喷流的高分辨率观测(包括 MERLIN, VLA, VLBI)进行理论研究时, 已提出许多希望由下一代的设备观测的问题了。射电天文的新发现历来与仪器设备的发展有很密切的关系。而仪器设备发展的中心问题仍然是灵敏度、分辨率和频谱覆盖。在这些方面, 未来的地面 VLBI(特别是 VLBA)、毫米波 VLBI 和空间 VLBI, 将会是互为补充的。本文主要讨论空间 VLBI 的科学目标和技术研究。

## 二、科学目标

空间 VLBI 首先是提高分辨率, 但目前提高分辨率的方法还有毫米波 VLBI。受 90 年代技术条件所限, 第一代的空间 VLBI 站(RADIOASTRON 和 VSOP, 即 VLBI space observatory programme 的缩写)都是用 10m 左右天线, 工作频率最高 22GHz, 最高分辨率约 50 $\mu$ as, 和 3mm 的地面 VLBI 相当。但单单依靠在某一频率上加长基线, 并不足以找出射

电核的细节,如果在该频率上已变成光学厚。这时只有用更高的频率才能深入观测到 AGN 的核心,因此地面毫米波 VLBI 是很必要的。然而,空间 VLBI 不仅使分辨率提高,而且( $u$ ,  $v$ )覆盖大大改善,可观测的天区增加,并能快速成图。RADIOASTRON 和 VSOP 的灵敏度和平均的地面 VLBI 相比,没有提高。一般可假定它和地面上 70m 口径的天线组成干涉,以确定其灵敏度,这和两个 25m 口径的天线相当,只能依靠记录带宽加宽,因此可观测的目标有限,而且空间 VLBI 的观测时间很宝贵,很需要论证清楚哪些课题和射电源值得优先观测。这里我们扼要介绍 RADIOASTRON 和 IVS 的科学目标的论证情况。虽然 IVS 未获得批准,但和 RADIOASTRON 不同,它是从地面 VLBI 观测研究的总结而发展的,更代表着 VLBI 的发展方向,其论证仍有很大参考价值。

### 1. RADIOASTRON<sup>[2]</sup>

#### (1) 普查

RADIOASTRON 的分辨率比地面 VLBI 高 10 倍,可用以对超致密的射电辐射做一次普查,第一阶段用 1.35cm 波段,以后用其他波段,希望最大限度地获得 AGN 和 QSO 的内层核心的信息。为了编制这个观测源表,需要确定我们希望观测而又能被观测到的源,观测方式,那一段时间观测(涉及空间 VLBI 站轨道平面取向)等等。据初步分析,这样的源可选出 30 个左右。总之,可以有三类研究内容:检测吸积盘(如 3C84, 3C120, BL Lac),喷流内层的图像以及激波演化(找到地面监视发现即将爆发的目标并要求重复观测),高红移超光速类星体的成图。

#### (2) 恒星

有可能观测的恒星有两类:X射线双星及 Rs CVn 和 Algol 双星,都有很强的射电爆发,且亮温度极高。SS 433 和 Cyg X-3 已用地面 VLBI 研究过<sup>[3,4]</sup>。空间 VLBI 的快速成图在这里很有用,而分辨率可能分辨出射电核心辐射。有可能观测 LSI + 61303, CircX-1, Sco X-1, SS 433, Cyg X-3, 以及 HR 5110, AR Lac 等。

#### (3) OH 和 H<sub>2</sub>O 脉泽源研究

可观测的目标也有 30 个。RADIOASTRON 将能分解和恒星形成区成协的密集 H<sub>2</sub>O 脉泽团的结构,作脉泽点的精密定位,从而以空前的精度得到恒星形成区系统运动的图像。

#### (4) 星际散射(Interstellar Scattering, ISS)

RADIOASTRON 的基线变化范围是 2 000 到 70 000km,对测定 ISS 衍射图样有利。可利用脉冲星通过测量双频的条纹相位变化以研究散射波前;利用脉冲星、H<sub>2</sub>O 脉泽、致密河外源(包括低频变源)测量角径加宽,测量脉冲星和 H<sub>2</sub>O 脉泽的散射面及其形状随时间的变化。约有 10 个脉冲星是在 RADIOASTRON 的灵敏度范围内。

#### (5) 天体测量和测地学(geodetic VLBI)\*

脉冲星天体测量、类星体天体测量,主要测视差、自行。地面 VLBI 已测出 3C345 的核(相对于 NRAO150)的周年视差  $10 \pm 50 \mu\text{as}$ <sup>[5]</sup>, RADIOASTRON 将可能提高精度 1 个量

\* 和传统的大地测量含义不同,测地学 VLBI (geodetic VLBI)在文献中一般指有关地球形状和取向的地球动力学的(geodynamic)和静态的现象的研究。geodetic VLBI 的研究课题有:极坐标(岁差、章动),极移和地球自转变化,固体潮,板块运动,也包括与之相关的天球参考系和地面参考系研究。作为比较,大地测量的英文是 geodetic surveying,

级。参考系研究, 从 POLARIS/IRIS 星表中选出几个未分解的连续谱源进行观测定位, 以研究地面和天球参考系统一的问题。同时源结构及其变化的影响, 对测地学也很有意义。

总之, RADIOASTRON 的分辨率比 VSOP 高, 是有特色的, 很适于首先做普测, 找出  $T_R \sim 10^{13} \text{K}$  的目标, 如果在这期间 VSOP 也发射, 则成图能力会加强。这项普测应以地面 VLBI 普测为基础, 特别是在频率 22GHz 和 327MHz 上做普测。同时, 在普测的基础上开展其他的观测项目。

## 2. IVS(International VLBI Satellite)<sup>[6]</sup>

比较起来, RADIOASTRON 和 VSOP 都只能说是探索性的。IVS 的灵敏度比它们提高 20 倍, 因为天线口径加大, 下行数据带宽增加, 接收机灵敏度更高, 而且用相位基准法 (phase referencing) 以增加积分时间, 最高分辨率提高 10 倍, 频谱范围更宽了, 而且频率较高 (4.5—120GHz)。IVS 除和地面 VLBI 阵联测外, 并用于单天线的频谱观测和宇宙微波背景辐射 (CMBR) 的观测。因篇幅所限, 这里只谈 VLBI。

### (1) 宇宙学问题

首先是距离测量。银河系中  $\text{H}_2\text{O}$  脉泽内部自行的弥散度约  $30 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 在 1Mpc 上这相当于  $6 \mu\text{s} \cdot \text{yr}^{-1}$ , IVS 的束宽为  $45 \mu\text{s}$  (IVS 的 40 000km 轨道, 频率 22GHz), 则如对脉泽特征的信噪比为  $\text{SNR} = 20$ , 定位精度约为  $0.5 \times 45/20 \approx 1 \mu\text{s}$ 。如果脉泽点的运动测量好于  $3\sigma$  的点数有  $N$  个, 则距离测量的形式误差  $\delta D/D \approx 1/\sqrt{2N}$ 。例如 M33 中的 IC133 的测量误差将在 15%—20% 之间。由于星系旋转的运动一般比内部运动大 10 倍, 所以如用轨道视差法测量, 则在 10Mpc 距离上相当于  $6 \mu\text{s} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。和统计视差法不同的是只要测几个强脉泽点即可。为了使系统误差小于  $1 \mu\text{s}$ , 在 1—2 年内把星系的距离测量形式误差限于 20%, IVS 的轨道应精确到 50cm。

对超光速源的统计研究提出了  $\mu-z$  图<sup>[8]</sup>, 这一研究提供一种宇宙学的检验。利用 VLBI 做自行测量包含有时空的转换; 而在爱因斯坦-德西特宇宙中,  $z$  增加自行减小, 但是按照  $\mu-z$  关系自行渐近地趋于一极限值  $0.2 \text{mas} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。对于高红移源, 几年自行量小于地面 VLBI 阵的综合束。这些源的自行和标准宇宙学一致, 但是分辨率不足限制检验的清晰度。IVS 的高分辨率把这限制推向更高的红移和更小的自行。

关于引力透镜, 有三方面的问题待研究: 确定源经过透镜后的特点, 测量透镜的详细特性, 测量相对的时间延迟。地面 VLBI 阵对 0957+561 的观测 (6cm) 在 100mas 尺度上呈反宇称性质<sup>[9]</sup>, 这是透镜模型所要求的, 但很需要 1mas 尺度上的详细图像。由 0957+561A, B 分量流量变化的测量, 导出相对时间延迟 500d, 可导出  $H_0 \leq 66 \pm 15 \text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ , 该误差考虑到不同的透镜模型, IVS 的高分辨率和成图能力, 可分离核源中的时变部分, 从而时延可测得更精确。

### (2) 类星体和星系

利用 IVS 的两个低轨道, 其成图能力足以提供和光学宽线发射区相当尺度的射电连续谱的总强度分布图和偏振分布图, 从而建立起发射区特性的联系, 对一些最近的星系, 可深入到吸积盘尺度。利用最高的轨道, 可达 AGN 的很有趣的尺度,  $10^{15}$ — $10^{17} \text{cm}$ 。

流量快速变化, 射电核的大小、定位和频谱, 喷流的结构和物理性质, 光学射电联系,

以及星系核中的  $\text{H}_2\text{O}$  巨型脉泽(megamaser)都是研究的目标。BL Lac天体在厘米波和毫米波段都有很剧烈和快速的流量变化,时间尺度短到小时。在厘米波段,有相当一部分平谱射电源也有5%到20%的变化,时间短到一天以内。若这些变化是固有的,则有 $\mu\text{as}$ 尺度的结构存在,可能需用相干辐射解释。若变化是非固有的,可能是恒星际衍射或折射效应所致,其角径仍必须大大小于 $0.1\text{mas}$ 。为区分这种可能性,要求IVS在最短的波长上观测,以分解或找出变化的成份,并测量其内部的自行。

射电核心(core)的物理起源至今未查明。它可能代表着在喷流的“基部”附近在准直过程中形成的光学厚的喷嘴(nozzle)。这种准直的、可能是锥形的喷流,可能包含有激波,产生连续的爆发,或许在基部开始时是X射线和光学辐射,随着磁场和粒子能量下跌,转化为IR,以后才到射电辐射。射电转换应该在 $\ll 1\text{pc}$ 的尺度上产生。地面VLBI已观测到3C120的超光速节点小于 $\text{pc}$ 尺度,这证实准直和加速在此点之前已经产生了。核心究竟是相对论性束的窄端还是和喷流分开的实体,有待高分辨率和高频的观测。需要检测几 $\text{mJy}$ 的核。

喷流的结构和物理性质仍有待于研究。对于射电核外流的物理性质所知甚少,但是可以相信当喷流前进时,可能和周围不均匀介质或不稳定的磁场或流质相互作用而引起激波和剪切,从而产生观测到的节点和热斑。但是目前的VLBI分辨率不足,节点不能分解。需要分解节点,并能弄清楚喷流的速度是否愈靠近核心时愈大。超光速运动节点在核心附近很复杂,已为地面VLBI观测到,有加速、减速、位置角的变化。研究这些节点在更靠近核心处的大小和结构,可澄清其动力学性质。喷流的物理学参数,特别是从偏振观测得到磁场强度和方向在致密核和喷流节点中的情况是很重要的。

### (3) 恒星

IVS有很高的分辨率和灵敏度,足以能对一个恒星的非耀发(non-flaring)区成图,并能研究某些邻近的M型矮星和密近双星中星冕的结构和起源。IVS不仅能研究恒星的宁静辐射,而且能研究单个恒星和密近双星的射电耀发。最大的耀发至少比太阳高1000倍(亮度和总能量),可能起因于高速自转速度,在对流幔中引起发电机效应,产生足够强的磁场活动,从而产生耀发。RS CVn和Algol型双星是现今最普通的射电星,地面VLBI观测已得到UX Arietis(图1)<sup>[10]</sup>的核晕结构。假设为迴旋同步加速辐射,在活动区磁场估计为 $10-50\text{G}$ ,亮温度 $10^8-10^{10}\text{K}$ ,角径 $0.5-2\text{mas}$ ,和星冕与双星间距相当。已知的射电辐射X射线源至少有15个,有4个是地球基线不能分解的( $<1\text{mas}$ ),只能是IVS的观测目标,其中包括SS 433和Cyg X-3。

射电超新星及其遗迹已有约10个被VLBI观测过。在 $10\text{Mpc}$ 的距离上估计每年会有几次超新星爆发,流量在几 $\text{mJy}$ 到超过 $100\text{mJy}$ ,所以IVS有能力观测到。需要高分辨率的成图和多波段光线的监测。有关的物理学问题是:(1)粒子加速过程的性质;(2)年轻星云内部中子星的存在问题;(3)爆炸中所发射物质的量和分布,以及形成纤维的时间;(4)超新星前质量外流的过去的历史;(5)确定距离,从而确定哈勃常数。IVS的高灵敏度和分辨率将对这些问题的研究有所帮助。

### (4) 分子云

脉泽研究很有利于探索恒星处于早期和晚期演化阶段中的外流的物理状况(密度、速度、

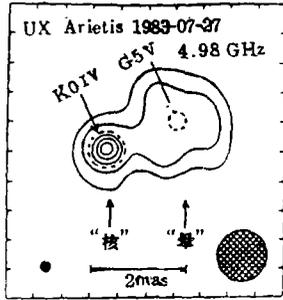


图 1 UX Arietis 的 VLBI 混合图, 频率 4.98GHz。右下角的恢复束为 1mas。IVS 轨道 2 的束示于右下角, 轮廓线为峰值亮度的 15%, 25%, 35%, 50% 和 90%。虚线表示恒星系统的相为 0.2。注意射电和光学图像对准是猜想

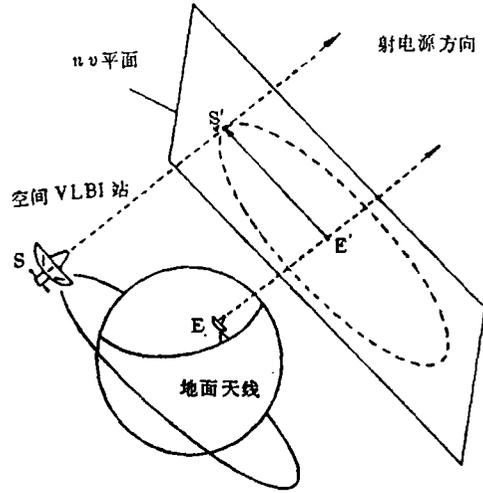


图 2 空间 VLBI 站和地面天线联测的示意图

湍流和磁场), 因为 VLBI 所达到的空间尺度很小, 为其他技术所不能及。但是 IVS 不工作于 OH 发射的 1.6GHz 频率, 因为 OH 脉泽受到星际散射的加宽, 估计不会比地面 VLBI 得到更多的信息。相反,  $\text{H}_2\text{O}$  脉泽在  $1.35\text{cm}$  的  $6_{10}-5_{23}$  旋转态跃迁的辐射不会受到严重的散射。IVS 的  $\text{H}_2\text{O}$  脉泽观测, 将提供作为银河系坐标函数的星际散射。值得注意的是, 在脉泽的情况下, 由于线发射频率是固定的, 只能靠增加干涉仪基线来提高分辨率, 即为了更多了解  $\text{H}_2\text{O}$  脉泽, 只有用地一空基线来达到。利用 IVS 观测  $\text{H}_2\text{O}$  脉泽可获得高动态范围的 VLBI 图像, 从而得到关于这些源的精确形状的信息, 这对脉泽的形成过程的解释将极为重要。

### 三、空间 VLBI 的原理

空间 VLBI 站和地面 VLBI 站就基本概念来说是相同的, 空间 VLBI 站可看作是从地面 VLBI 阵伸出去的一个天线。图 2 表示最简单的情况, 地面和空间都仅有一个天线。 $uv$  平面和以前一样, 一个空间天线的绕地球一周的单一轨道所形成的  $uv$  轨迹示于图 3a。图 3b 则表示若干个轨道所形成的  $uv$  覆盖图, 该图有许多个环, 而每个环是由于卫星在一个轨道期间内快速运动而造成的, 每个相邻的环之间有小小的位移, 那是由于地球自转使得在每圈轨道上东西向基线投影略有差别。

实际的情况是地面上有许多天线参加观测, 因而  $uv$  平面很快就充满了, 而且容易通过许多基线的组合作自校准。 $uv$  覆盖的密度将随着相继的轨道而增加。如果在一个波段内做多频率观测,  $uv$  覆盖又会更加改进。

前面已提及, 空间 VLBI 的  $uv$  覆盖和射电源方向相对于轨道平面的取向等因素有很大的关系。轨道的升交点角  $\Omega$  定义作轨道和地球赤道平面的交线(当卫星向北移动时)和春分点之间的夹角。对于特定的射电源成图观测, 视角(Viewing Angle)是一个有关的量。视角定义作轨道角动量矢量在赤道平面上的投影和射电源赤经(RA)的夹角, 沿赤经增加的方向上

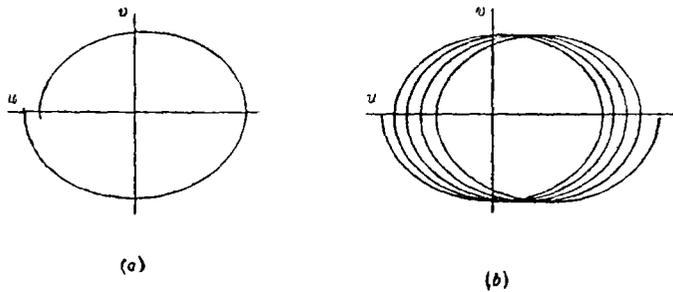


图 3 (a) 空间 VLBI 站单一轨道的  $uv$  覆盖  
(b) 若干轨道形成的  $uv$  覆盖

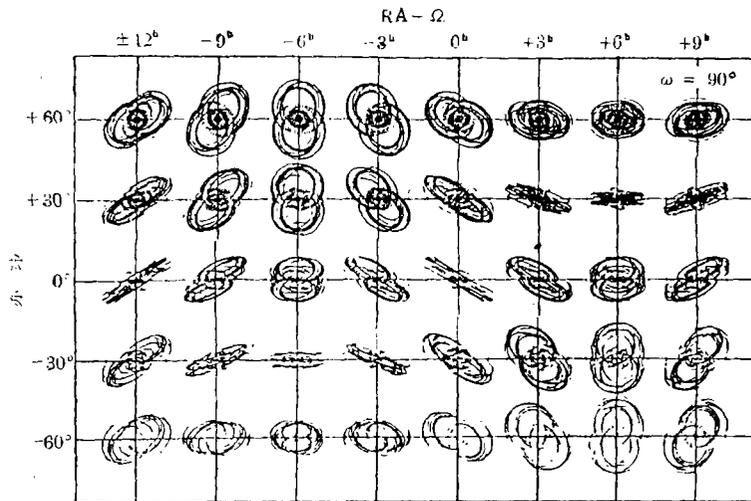


图 4 一个空间 VLBI 站和地面 VLBI 阵联测的  $uv$  覆盖的一个例子。不同的  $uv$  覆盖表示轨道在天空中不同的方向。见正文中的说明

发送到地面上的遥测站，记录在磁带上，以后送到一个 VLBI 相关处理机，和其他站的磁带一起得到干涉的结果。

### 1. 频率的选取

空间 VLBI 的观测频率取作 22GHz, 5, 1.6 和 0.3GHz。其中 22GHz 是水分子  $H_2O$  的脉泽发射线，而 1.6GHz 是羟基脉泽发射线，同时 22GHz 是地面常设 VLBI 网的最高频率，在这个频率上，有最大的天线（例如 100m 天线），因而空间天线可得到较好的灵敏度。

经验表明，在射电图像上，分辨率和表面亮度的灵敏度应相匹配。第三个频率 5GHz，近似是两个脉泽频率的几何平均，它填补了空缺，提供了一个不同分辨率和表面亮度灵敏度的组合。在地面上，5GHz 是高质量成像的一个主要频率，受大气传播延迟的影响为最小，而且该频率对活动星系核中光学薄的喷流的成像特别有利。最低频率 0.3GHz 对于研究致密陡谱源 (CSS)、低频变源和星际介质很重要。

RADIOASTRON 和 VSOP 都选择了这些中的频率。但是 IVS 有不同的考虑。它更多

量度 ( $VA = RA - \Omega + 90^\circ$ )。有的文献直接用  $RA - \Omega$  表示。图 5 表示作为  $RA - \Omega$  的函数的空间 VLBI 的  $uv$  平面的一些例子。 $uv$  平面中退化为一维的情况对应于把轨道平面投影到天空方向。轨道平面对赤道平面有一定的倾角，使南北孔径覆盖改善，同时，对地轴也有一定的倾角，使轨道有一定的进动（由于地球的扁率）。这样，便有可能在升交点的不同 RA 值上观测，以减少  $uv$  平面上“空洞”的影响，改善成图的质量。

空间 VLBI 站上的设备有两大部份（图 5）：一部份是射电望远镜，包括天线、馈源系统、接收机、热控制、整理信号的设备；另一部分是支撑条件，功率、姿态和轨道控制与测量，以及地面通讯系统。必须把宽带的天文数据连续地

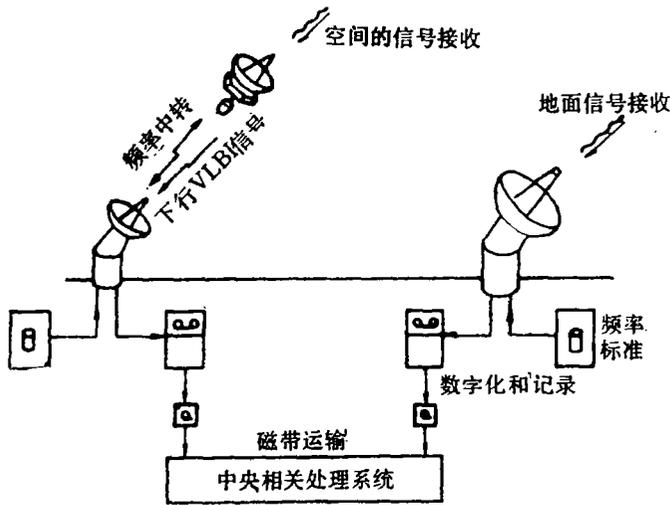


图 5 空间 VLBI 站和地面 VLBI 阵联测系统的示意图

地考虑到高频率, 而且频率覆盖比较宽, 即 4.5—8.5, 15—23, 42—63, 86—120GHz, 争取 218—222GHz。1.6GHz 的 OH 谱线也已略去, 理由如本文科学目标中所述。

2. 灵敏度和分辨率

空间 VLBI 和地面一样用双天线干涉仪的热噪声公式来估计灵敏度, 以 mJy 为单位,

$$\sigma = 5 \times 10^3 \frac{b}{D_1 D_2} \left( \frac{T_1 T_2}{\eta_1 \eta_2 B \tau} \right)^{1/2},$$

式中  $D_{1,2}$  是天线口径 (m),  $\eta_{1,2}$  是天线效率,  $T_{1,2}$  是总的系统温度 (K),  $B$  是工作带宽 (MHz),  $\tau$  是积分时间 (s)。RADIOASTRON 和 VSOP 的天线口径均为 10m, 而 IVS 也只有 20m 左右, 因此会优先考虑和地面上最大的天线联合观测, 估计全球口径在 70m 以上的天线约有 11 个, 而最大的天线有几个, 即 Effelsberg 的 100m 天线, 相控的 VLA 等效口径 130m, 将来还有 NRAO 的 GBT, 约 100m。为了使综合条纹拟合法(global fringe fitting)能有效地运行, 至少要在一条空间 VLBI 站—地面天线的基线上顺利地找到条纹, 换言之, 只有在空间 VLBI 站和 Effelsberg, GBT 和 VLA 组成的基线上得到条纹的射电源, 才能作为观测的对象, 这就是灵敏度的限制。为可靠地检测射电源的强度应有 5—7 $\sigma$  (mJy) (见表 1)。为对最小可测的亮温度作出估计, 可计算图像的复原束(FWHM), 并取它的 1/3 为正好能被分解的高斯分量直径(FWHM), 从而可计算出这些分量能被检测到的最小亮温度。

### 3. 轨道的选取

表 1 RADIOASTRON 的灵敏度和角分辨率

频率(GHz)	单位	0.327	1.66	4.83	22.2
系统温度	K	90	60	70	135
天线效率 (10m 口径)		0.5	0.5	0.5	0.3
带宽(2-bit 采样)	MHz	4	16	16	16
最小相关流量 (5 $\sigma$ , $\tau=100s$ )	mJy	220	55	70	220
图像噪声 (5 $\sigma$ , 16h 积分)	mJy	8	3	3	8
最大角分辨率	mas	2.5	0.5	0.17	0.035

设地面天线为 70m 口径, 效率 0.5(0.327, 1.66, 4.83GHz), 0.4(22.2GHz), 系统温度 80K, 30K, 40K, 100K, 2-bit 采样。

轨道的选取要考虑到高分辨率的需要和对致密源的成图能力,两者是不能兼得的,因而要取折衷。如分辨率提高 10 倍,意味着轨道是一个相当扁的椭圆,只是在一维上有高分辨率,而在这种情况下,由于缺少中间间距,成图能力较差。图像的逼真度(fidelity)是  $uv$  覆盖和射电源的复杂程度的一个复杂函数,也和可见度数据的误差有关。对于空间 VLBI,  $uv$  覆盖又是射电源方向相对于轨道平面的方向、轨道参数和地面上天线阵的天线数目和分布的强函数。在空间天线的远地点超过地球的直径时,  $uv$  覆盖便出现“空洞”,从而使由数据重建的图像质量下降。

很长的轨道在检测射电源方面也有问题,因为表面亮度灵敏度是有限的,而且在长厘米波段上射电源由于星际介质而变得模糊起来。

自 1984 年以来,空间 VLBI 轨道选取有过很热烈的讨论。一种意见认为分辨率提高 10 倍以上有可能发现新的、基本的物理现象,而动态范围有 20:1 就可以了。视超光速现象的发现并未依靠高质量的图像。有些人则强调高动态范围,因为地面 VLBI 已受到动态范围的限制,空间 VLBI 可以大大提高动态范围。实际上 QUASAT 计划最初的设计就是要求最好的  $uv$  覆盖,其轨道的近地点为 5708km,远地点 12525km,因此分辨率只比地面分辨率提高 2 倍,这一最初的设计是在 1984 年发表的<sup>[11]</sup>。

到了 1988 年,QUASAT<sup>[12]</sup>计划的科学目标和轨道选取的研究又取得了新进展,利用不同轨道参数做模拟成图研究,选用了远地点高达 36000km 的轨道,分辨率提高了,而成图能力比地面 VLBI 现有的最好图像还好得多。1989 年提出的 IVS 计划则设想有三个轨道,分别是 2000km, 4000km 和 150000km,进一步兼顾到成图能力和特别高的分辨率。

正在实施中的 VSOP 有一定的成图能力,分辨率不特别高,而 RADIOASTRON 则有特别高的分辨率,成图能力有限,它们都只能照顾到一个方面,可以说是向空间 VLBI 跨出了一大步,IVS 要算是第二代空间 VLBI 了,它代表着发展方向。

#### 4. 成图能力的研究

通过空间 VLBI 站和地面 VLBI 网的联合观测,以产生致密射电源的高分辨率的图像,是空间 VLBI 研究的一个主要目的。轨道 VLBI 成图能力的研究已进行 7—8 年<sup>[11,12,6]</sup>,所采用的方法是“blind”试验,也就是造出一套可见度数据,这些数据中含有实际观测的各种误差,交给一个人去作成图处理,而他在事先不知道该源的真结构,在成图完成之后再和真结构作比较。

在轨道的参数确定后,  $uv$  覆盖图便与  $RA-\Omega$ , 射电源的赤纬以及地面 VLBI 阵的数目和分布有关。大量的 blind 试验已证明,利用一个空间 VLBI 单元,如果轨道合适,便能产生高质量的图像,而试验所用的数据和实际的数据相似,也就是可见度数据加上各种可能的误差,特别是相位误差,例如地面 VLBI 站上大气中的传播误差,飞船的相位传递误差,基线误差等等。

图像的质量用动态范围表征,但实验表明,在 CLEAN 图上的系统误差随源发射区的亮度而异,因为在靠近亮特征处旁瓣很难抑制,这是 CLEAN 方法造成的。因此,图像的动态范围仅能够反映图像的相对好坏,而难于给出图像的真实性,因此在空间 VLBI 成图能力研究中,已更多采用逼真度(fidelity),即图像中峰值亮度和差分图像中源上(on-source)

的误差，它代表着所成图像和真亮度分布的接近程度。

远地点的高度超过地球直径时， $uv$  覆盖图上必然产生空洞， $uv$  空洞( $uv$ -holes)意味着构成源结构的傅里叶分量失去了部分采样值。因此早期的研究强调牺牲一些分辨率，以避免对这部分失去的采样值内插而引起的麻烦。但是近年来的研究表明<sup>[12]</sup>，在不同升交点 RA 值处对源作观测可使空洞变小，而由于升交点的进动，在实践上是可能的。这样，即使有一些空洞，仍可以产生很好的图像。IVS 建议书所设想的三种轨道是在成图能力研究的基础上提出的。其轨道 1 是低远地点的，约 20 000 km，若地面上有 20 个天线参加观测，则产生的图像可以和 VLA 的图像媲美。轨道 2 的远地点约 40 000 km，有相当大的  $uv$  空洞，成图能力要差得多，但分辨率较前提高了 2 倍，成图能力和当前地面 VLBI 最好的图差不多，但分辨率总共提高了 5—6 倍。轨道 3 的  $uv$  覆盖呈长椭圆形（远地点高度 150 000 km），因而真正的 2 维成图不可能，但和早期的 VLBI 那样，可以用简单模型拟合可见度数据，以获得模型分量的间距、大小、亮温度、位置角等。因为分辨率比地面 VLBI 提高了 15—20 倍，可以得到靠近中央发动机的从未有的新信息。空间 VLBI 的模拟成图试验，可用以考查空洞大小对成图能力的影响，从而确定多大的空洞不能被接受，进而确定一种分辨率和图像质量的最佳组合的选择，这是最近几年才发展起来的。

RADIOASTRON 和 VSOP 可能在 1995—1996 年发射，一个有较扁长的轨道，一个有较低的轨道。研究表明，RADIOASTRON 仍有一定的成图能力<sup>[2]</sup>，其图像的逼真度最好可达约 40:1，如果和 VSOP 联合观测，可达约 180:1，这一模拟试验假设的地面 VLBI 站包括 DSN(美国深空跟踪站)，VLBA 和 Nobeyama 天线。在 RADIOASTRON 轨道的特定取向上，逼真度可以更好些。有关 RADIOASTRON 和 VSOP 的成图能力和观测能力的研究，仍在进一步深入中。例如相位和幅度误差的影响，对弱源的条纹拟合，以及逼真度和轨道取向、地面 VLBI 站分布等等因素和成图能力的关系。这些研究对观测项目的选取显然很有作用。

#### 四、展 望

空间 VLBI 观测从提出讨论到现在已有 20 多年。1986 年的 TDRSS(Tracking and Data Relay Satellite System)空间 VLBI 实验已跨出了一步，同时，许多年来有关空间 VLBI 的科学目标和技术研究已进行了大量的工作，这些研究报告和论文代表着下一代 VLBI 的发展方向，是很有价值的科学论文。

由于 RADIOASTRON 和 VSOP 的天线口径较小，只有 10m 左右口径，地面 VLBI 阵首先是考虑大天线参加。目前可预期在 1995—1996 年，空间 VLBI 研究将进入观测阶段。

RADIOASTRON 有一个科学目标工作组，研究观测目标。现在尚不清楚 RADIOASTRON 是否向全体 VLBI 界开放使用。RADIOASTRON 的联测天线预计有澳大利亚、加拿大、欧洲、日本、美国、和原苏联等国。RADIOASTRON 本身是国际协作项目，原苏联负责放卫星和天线，低噪声放大器由欧洲做，此项目利用和 VLBA 兼容的记录终端，以及 VLBA 处理机。所以其开放的程度估计较大。VSOP 是另一种情况，它似乎是自给自足的，即终端、处理都会自己解决。我们已指出 RADIOASTRON 和 VSOP 都是第一代的空间 VLBI，在某种程度上是探索性的，由于灵敏度的原因能观测到的对象有限，成图的动态范

围也不足, 如果 VSOP 和 RADIOASTRON 同时在空间工作一段时间, 动态范围可大为改善。无论如何, 这一代空间 VLBI 将会有一些引人注目的观测成果。预期在今后 10 年里将会形成空间 VLBI 观测的研究队伍。而像 IVS 那样的第二代 VLBI 将会再等待一些时间, 但这应该是 VLBI 发展的必然途径。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 万同山, 天文学进展, 8 (1990), 268.
- [ 2 ] 8th RADIOASTRON Review Meeting, (1989).
- [ 3 ] Vermeulen, R. C. et al., in *The Impact of VLBI on Astrophysics and Geophysics*, ed. by M. J. Reid and J. M. Moran, p. 275, (1988).
- [ 4 ] Molnar, L. A. et. al., in *The Impact of VLBI on Astrophysics and Geophysics*, ed. by M. J. Reid and J. M. Moran p. 279, (1988).
- [ 5 ] Bartel, N., in *The Impact of VLBI on Astrophysics and Geophysics*, ed. by M. J. Reid and J. M. Moran p. 175, (1988).
- [ 6 ] V. Altunin et al., *IVS—An Orbiting Radio Telescope, Report on the Assessment Study*, (1991).
- [ 7 ] Reid, M. J., *Ap. J.*, 330 (1988), 809.
- [ 8 ] Cohen, M. H. et al., in *The Impact of VLBI on Astrophysics and Geophysics*, ed. by M. J. Reid and J. M. Moran, p. 23, (1988).
- [ 9 ] Gorenstein, M. V. et al., in *The Impact of VLBI on Astrophysics and Geophysics*, ed. by M. J. Reid and J. M. Moran, p. 201, (1988).
- [ 10 ] Mutel, R. L., *Ap. J.*, 289 (1985), 262.
- [ 11 ] Fabian, A. C., *Quasat—A VLBI Observatory in Space*, Proceedings of a workshop held at Gross Enzersdorf, Austria, on 18—22 June, 1984.
- [ 12 ] *Quasat—A Space VLBI Satellite, Report on the Phase A Study*, (1988).

(责任编辑 刘金铭)

## Joint VLBI Observation with Space VLBI Observatory and Ground VLBI Array—Next Generation VLBI

Wan Tongshan

(Shanghai Observatory, Academia Sinica)

### Abstract

We describe space VLBI research in two aspects. Firstly we present the discussions on scientific objectives. RADIOASTRON has limited sensitivity, while its baseline is a factor of ten longer than baselines on Earth. The problems are to find what classes of sources can be observed and what types of observation should be used. IVS is second generation space VLBI. We present with emphasis on the questions derived from observations on ground VLBI. In the second part of this paper, we present technical research, including concept of space VLBI, sensitivity and angular resolution, and research on orbit and imaging quality. It is expected that a space VLBI contingent will be built up over the next decade.