

VLBI 技术(天体物理)的进展 和中国 VLBI 网的意义*

万 同 山

(中国科学院上海天文台)

提 要

本文简略地回顾了 VLBI 天体物理和技术方法的重要进展,并说明了作为观测手段的 VLBI 现阶段对课题研究的限制,主要体现在灵敏度不足、动态范围不足以及 VLBI 处理很费时这三方面,而这些困难将随地面 VLBI 的进展以及空间 VLBI 和毫米波 VLBI 的发展而改观。最后,简要地提及中国 VLBI 网的意义。

一、引 言

我们在“90年代的 VLBI 天体物理学”^[1]一文中已评述了近年来 VLBI 天体物理学的进展,这里我们扼要地提及 VLBI 研究所取得的具有历史意义的成就,并着重于说明,经过 20 年的大量 VLBI 实验,虽已得到这些引人注目的结果,但是要进一步开展深入研究,却受到仪器性能的限制。

在河外连续谱天文学方面,超光速运动现象是研究得很多的,也是最有兴趣的课题,现在已知道,致密射电源多数有超光速现象,所以在河外射电源中超光速现象是比较普遍的,而且被看作是发射物质的相对论性整体运动。在靠近核心处的超光速节的运动可能十分复杂,例如 3C345 类星体,它的一个节在距核心 2pc 处有 2—6 倍光速的加速运动,而且相对于核心的位置角变了 40° ,表明该节的运动路径是弯曲的^[2]。研究这些节在核心附近的大小和结构,可以弄清楚引起这种运动的物理原因。为了跟踪这种节的演化过程,同样也需要研究它们在离开核心后消失的形态,而要实现这一点,许多 VLBI 图的动态范围是不够的,分辨率也不足。

在星际脉泽观测方面,测出 H_2O 脉泽的自行从而测定天体的距离是一大成就。距离测量在天文学研究中有基本的重要性,它涉及到宇宙年龄的估计。 H_2O 脉泽自行给出天体距离的直接估计,它和绝对光度和消光无关,因而不产生有关的系统差。这种方法假定脉泽的空间速度的弥散度在三维空间坐标是相同的,因此测得的视向速度的弥散度 ($km \cdot s^{-1}$)除以测得的自行的弥散度 ($rad \cdot s^{-1}$),便得到了距离。在银河系内典型值是,视向速度弥散度 $30 km \cdot s^{-1}$,自行 $0.6 mas/yr$ 。如果要测量最近的旋涡星系 (1Mpc),则脉泽自行的测量精

度应为 $6\mu\text{s}/\text{yr}$ 。这样的测量最好是利用空间 VLBI 了。这样的研究并不在于多，而在于精度高，即使测得一个星系的距离，就能够对造父变星和其他的距离指示器做出关键性的校准。利用地面 VLBI 测量河外源自行要用最大型的天线，这方面的计划仍在进行中。利用 VLBI 测量周年视差的例子是测定 3C345 和 NRAO512 的相对自行，两者相隔 $\sim 0^\circ.5$ ，精度达 $50\mu\text{s}$ (标准差)，比光学方法好约 10 倍。NRAO512(1638+398, $Z=1.67$) 是比 3C345 (1641+399, $Z=0.595$) 远得多的致密类星体。这类测量不要求高动态范围，但要用大型天线，使参考源有良好的信噪比。

至于脉冲星，其 VLBI 研究的主要意义是 (a) 把脉冲星当作是星际介质的指示器；(b) 测定其自行和视差；(c) 测定脉冲中的相位移动。

脉冲星是恒星演化到晚期的中子星，极为致密 (25km 直径)，有强磁场 (10^{13}G 量级)，自转速度可达每秒 1000 次。脉冲星距离在几十至若干千秒差距之间。大多数的脉冲星在波长大大短于 18cm 时很弱，且无法观测到。米波观测更为有利，但易受电离层影响，所以 18cm 较合适些。和脉冲星有关的一些尺度，如圆面大小、光柱速度半径等，利用地面 VLBI 均不能分辨。脉冲星测量自行方法中要利用很靠近的基准源，它应是河外未分解 (或不变) 的，自行可视为零的，而且很亮的基准源，脉冲星相距基准源 $< 5^\circ$ ，因此，在目前的灵敏度下，待测源就屈指可数了。

表 1 1985—1987 年 VLBI 观测课题分类*

课 题 名 称	观 测 次 数
类星体、射电星系	178
超光速运动	32
高动态范围成图	10
毫角秒结构	14
角径加宽现象	41
射电核	13
致密结构	29
源结构变化	18
核心成图	3
陡谱致密源	18
偏振	11
普测	81
脉冲星	10
相互作用双星系统	12
脉泽	13
引力透镜	1

* 被测源总数是 264 个，观测次数是指源次。

Gwinn 等用相位基准法测定了脉冲星的自行和视差，利用了 Arecibo 和 Green Bank 大天线，得到 PSR0823+26 和 PSR0950+08 的视差分别是 2.8 ± 0.6 和 $7.9 \pm 0.8\text{mas}$ ，对应距离分别是 360 ± 77 和 $130 \pm 15\text{pc}^{[3]}$ 。

至于恒星 (或称射电星) VLBI 观测，对天体物理是很重要的，但迄今 VLBI 网的灵敏度不足，现今 VLBI 灵敏度约为 10^{10}K (300s 积分) 表面亮温度，而热辐射源表面亮温度一般小

于 10^4K 。

综上所述, VLBI 天体物理观测主要集中在类星体、射电星系核, 这是河外连续谱天文学领域最感兴趣的问题, 另一部分是河内天体、分子脉泽和恒星。两者所涉及的均是致密源, 亮温度超过约 10^8K 。总的课题是研究产生致密射电源的天体物理学过程, VLBI 以外的其他的任何观测手段都无法胜任。遥远天体的自行, 其角尺度在毫角秒以下以至微角秒, 是天体测量学的 VLBI 课题。在表 1 中给出 1985—1987 年间全球 VLBI 天体物理观测的课题分布情况, 涉及的射电源共有 264 个。这种分布给出了一个粗略轮廓, 说明 VLBI 天体物理学的兴趣, 以及当前 VLBI 设备的观测能力。

二、地面 VLBI 的观测和处理能力

目前用于常规性观测的波段有 90cm, 50cm, 18cm, 6cm, 3.5/13cm, 2.8cm, 1.3cm; 毫米波 VLBI 是特别组织的, 已经有 3mm 和 1.3mm 的实验。

1. 分辨能力

好于 1mas 的角分辨率往往需要洲际的基线, 其线分辨率对邻近恒星近似为 0.05AU, 对银河系内的星际脉泽近似为 0.5—5AU, 对射电星系和类星体为 0.25—5pc。对 $10^8 M_{\odot}$ 黑洞的史瓦西半径 $R_S \approx 3 \times 10^{13} \text{cm}$, 宽线发射区 $\approx 1\text{pc}$, 而窄线发射区 $\approx 100\text{pc}$ 。因此现在 VLBI 有可能分辨宽线发射区而离开“中央发动机”尚远。经验表明, 观测分辨率愈高, 所观测到的现象就愈复杂, 图 1 显示未来的空间 VLBI 站 IVS 的分辨率对一个典型活动星系核所能观测到的尺度。图示其内部结构的原理, 若主要能量源是 $10^8 M_{\odot}$ 量级质量, 则在几倍 R_S ($R_S \approx 3 \times 10^{13} \text{cm}$) 以内广义相对论应起重要作用, 并在 $1 \text{pc} (= 3 \times 10^{18} \text{cm})$ 的范围内引力场(产生势阱 $\propto r^{-1}$) 起主导作用。在较大的尺度上, 则辐射和流出物质与母星系周围物质的互作用是决定性的。

2. 灵敏度^[4]

(1) 单基线灵敏度(对于点源)

对于相位稳定的传统干涉仪系统而言, 最终的灵敏度取决于所有基线在整个观测时间内的积分。对于 VLBI, 一般情况相位不稳定, 不能找到足够强的“点”源做相位校准, 检测到源的灵敏度限制在相干时间之内。目前在 VLBI 处理中, 必须首先在每条基线上都找到条纹, 在一条基线上, 1σ 噪声

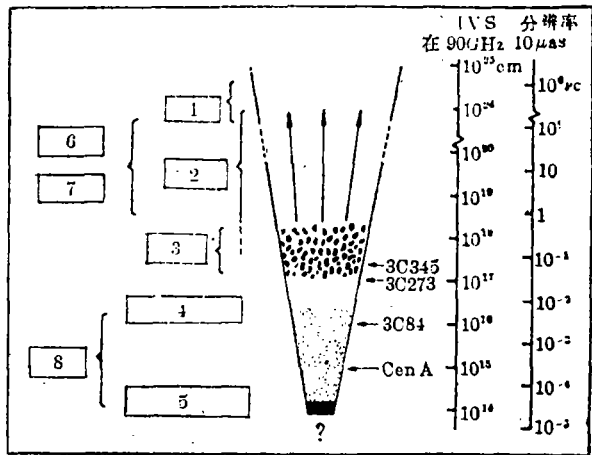


图 1 活动星系核的典型模型

1. “经典”射电瓣; 2. 准直外流物(喷流); 3. 宽线区(BLR); 4. 发射 10^{46}erg^{-1} 的 10^4K 黑体的半径; 5. 发射 10^{46}erg^{-1} 的 $3 \times 10^5 \text{K}$ 黑体的半径, $10^8 M_{\odot}$ 黑洞的半径;
 6. 光学图像; 7. 狭线区(NRL); 8. 预计的吸积盘尺度
- 图中标出的几个射电源: 半人马座A(距离: 5Mpc); 3C84(距离: 53Mpc); 3C273(距离: 相应于 $z=0.158$); 3C345(距离: 相应于 $z=0.595$), 是未来空间 VLBI 站 IVS 在 90GHz(轨道 2, 分辨率 $10\mu\text{as}$) 上所能探测到的深度。
哈勃常数 $65 \text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1} [5]$ 。

电平可以写成:

$$\sigma = \eta_b \sqrt{\frac{T_{S1} T_{S2}}{2 \Delta t \Delta \nu K_i K_j}}$$

式中 η_b = 总的损耗, $T_{S1,2}$ = 系统噪声温度, $\Delta \nu$ = 记录带宽, $K_{i,j}$ = 天线灵敏度。

为了可靠地检测到条纹, 在相干积分内至少要有 5σ 的信号。在 VLBI 观测中, 由于各天线的灵敏度差别很大, 因而各条基线的灵敏度很不同, 从而限制了最终的灵敏度。由于这个原因, 目前 VLBI 观测对象多为强源, 用 MK II 系统约为 0.5 Jy , 用 MK III 系统约为 0.1 Jy (这时要求带宽高达 56 MHz , 一盘磁带仅记录 13 min)。1985—1987 年作为天体物理课题的射电源不到 300 个。在很少的情况下, 利用 EVN 的大型天线和 MK III 系统, 曾对 NGC4151 成图, 其总流量仅为 $\sim 15 \text{ mJy}^{[6]}$, 这是迄今所知的最弱的源被成图了, 但在大多数 VLBI 观测中达不到这样的灵敏度。

利用综合条纹拟合法(GFF)可改善单基线条纹检测的灵敏度限制。在多条基线的情况下, 可以利用在灵敏的基线上得到条纹的参数, 控制较不灵敏基线的条纹搜索, 这时有关的误差是统计性质的, 在较不灵敏的基线上即使信号和噪声相当也可利用。这种情况和传统的联结干涉仪相同。但相位仍存在传播误差和其他误差, 需要自校准后才能成图; 由于采样点增加, 图像的噪声因而会下降, 即提高了灵敏度。

表 2 单基线灵敏度计算实例*

基线	记录终端	σ (mJy)	5σ (Jy)
Onsala(25m)—Jodrell(25m)	MK2	77.0	0.4
($\eta_{1,2}=0.5$, $T_{1,2}=50\text{K}$)	MK3	10.3	0.05
Shanghai—Ürümqi	MK2	154.0	0.8
($\eta_{1,2}=0.5$, $T_{1,2}=100\text{K}$)	MK3	20.6	0.1

* 利用公式:

$$\sigma = \frac{5 \times 10^6}{D_1 D_2} \sqrt{\frac{T_1 T_2}{\eta_1 \eta_2 \Delta \nu \Delta t}}$$

式中 $\eta_{1,2}$ = 天线效率

$D_{1,2}$ = 天线口径(m)

$\Delta \nu$ = 记录带宽Hz

Δt = 积分时间(s), 取 $\Delta t = 60\text{s}$

对于更弱的射电源, 当 GFF 和自校准方法都不行时, 就只能在相干积分时间内(例如 300s)内改正相位误差。利用相位基准法(phase referencing), 只要在被测源的邻近($< 5^\circ$)有一个强源, 即使信号湮没在噪声中也能检测出来。其必要的条件是强的基准源($\geq 0.5 \text{ Jy}$), 高精度的几何参数(基线参数, 用于相关处理), 基准源的混合图(如不是点源)。事实上, 相位基准法是传统干涉仪采用的, 并非新概念, 但 VLBI 相位不稳定, 实际工作很不容易。

灵敏度的限制在于检测出条纹, 如果这一条件得到满足, 则如上所述图像的信噪比将随着 uv 平面上采样点的增加而提高。长积分时间(在相干时间内)可以在图像处理中压缩数据节省机时, 而没有别的好处, 相反可能平滑掉源结构, 所以高于检测到条纹的积分时间并不一定有利。

(2) 阵灵敏度(或综合灵敏度)

如果所有的基线综合分析, 而且在整个观测时间上能相干积分, 则灵敏度有很大提高, 如设 T_s , η 都相同, 有

$$\Delta I = \frac{2k T_s \eta_b}{\eta \sqrt{\Delta\nu \Delta t}} \frac{1}{\sqrt{(\sum_i A_i)^2 - \sum_i A_i^2}}$$

可看作是和阵中所有收集面积总和相当的一个大天线的灵敏度。此式适用于相关干涉, 不适用于自相关。式中 k 是玻耳兹曼常数, A_i 是阵中第 i 个天线的接收面积。上面提到, 由于采样点增加, 图像信噪比提高已经利用了阵灵敏度的概念。但是 VLBI 图像的信噪比很难达到这个公式的估计, 而联结干涉仪能够达到。适当地假设天线效率、系统温度, 并设观测时间为 8 小时可得到一些阵的灵敏度:

VLBA(常规带宽)	39 μ Jy
90 年代 EVN(MK II)	12 μ Jy
VLA(现有 5GHz 系统)	11 μ Jy
EVN + VLBA + VLA + Green Bank	7 μ Jy(用 VLBA 终端)

事实上很难达到上述灵敏度, 原因是动态范围不足。

3. 动态范围和保真度(fidelity)

动态范围是射电源图像中最亮特征和离源(off-source)噪声的比值。动态范围不但和灵敏度(或信噪比)有关, 而且和 (u, v) 覆盖有关, 因为测量中的随机噪声产生图像上的随机噪声, 而 (u, v) 覆盖中的空洞丧失信息, 产生系统的图像误差。可见度误差是以两种方式形成的, 即与望远镜有关的和与基线有关的。利用自校准方法能有效地消去与望远镜有关的误差, 但是还有非闭合的校准误差不能被消去, 也影响着动态范围。经过大量的努力, 在几种不同射电干涉阵上动态范围的量级大致为:

WSRT, VLA $\sim 10^5:1$

MERLIN $\sim 10^4:1$

全球 VLBI $\sim 10^3:1$

个别 VLBI 图的动态范围也有达到 7000:1 的^[7]。作为比较, 早期的 VLBI(很少的基线)约为 20:1, 而将要发射的空间 VLBI, Radioastron, 动态范围可达 200:1 左右。

动态范围的重要性是显而易见的, 如设源中最亮的特征为 1Jy, 而动态范围是 1000, 则离源噪声为 1mJy; 但是, 利用 MK2 的阵灵敏度比此值要小得多, 这时限制因素首先是动态范围不足。至于 VLA, WSRT, MERLIN, 噪声限制才起更重要的作用。从这里可看出, 组织尽可能多的天线做 VLBI, 并建造优良 (u, v) 覆盖的 VLBI 网的重要性。此外, 我们还要指出, 利用现有的天线在地面上组网观测, 即使天线再多也不能和传统的干涉阵相比。如果一个射电源既有致密部分也有展源部分, 那末短基线的不足对 VLBI 是有重要影响的。现在欧洲 VLBI 网和 MERLIN 可以联合观测, 就是改善这种情况的一种努力。有人预计, 到 90 年代末 VLBI 的动态范围有可能再提高一个量级。

需要指出, 动态范围并不一定反映图像的可靠性, 它和源结构模型和成图方法有些关系, 而且离致密区远近不同噪声也会不同。因此, 需要定义保真度(fidelity)^[8], 它才反映源图像的解的唯一性。保真度是源模型和图像的差分图像(difference image)上的亮度峰值

和源上(on-source)噪声之比。利用由已知源的假数据做测试证实, 源上流量测量值的可靠性比离源(off-source)的噪声坏得多。但是, 由于射电源真图像是不知道的, 保真度只用于成图能力研究中, 例如研究空间 VLBI 站的成图能力。

4. 处理能力

纵观 VLBI 的发展可以清楚地看出, VLBI 课题研究的进展始终和技术方法相联系。单基线的灵敏度, 从 MK I 到 MK III, 系统噪声提高 3—4 倍, 总的灵敏度提高了 500 倍以上, 而动态范围则提高了近 100 倍。同时, VLBI 特有的成图方法发展起来了。这些进展导致令人信服的超光速运动图像, H₂O 脉泽自行的测量, 当代大陆漂移的测量等重要学术成就(见表 3)。然而, 尽管大型计算机和 VLBI 专用软件包的投入运转已很成功, VLBI 的数据分析还未能达到常规化的程度, 把 VLBI 的原始数据转变成天文学的有用数据和图像, 要花费很大的精力, 才能取得令人满意的结果。其原因主要是: (1) 相关处理的能力不足, 以一个 5 台站的 VLBI 实验为例, 利用一个 3 台站处理机需要做 4 次(见表 4), 而在目前这样的实验是小型的。如果利用 CALTECH 的 16 台站的处理机(MK II 型)处理, 情况要好得

表 3 VLBI 发展重要事件

1967	第一批 VLBI 条纹(加拿大模拟式记录终端, NRAO/Cornell MK I; MIT) (a) 测出类星体角径(天文) (b) 绘出 OH 脉泽条纹率图像(天文)
1970	精密测量延迟的综合带宽法(测地、天测)(方法)
1970	制成 NRAO MK I 记录终端(技术)
1971	发现超光速运动现象(天文)
1973	重新发现闭合相位的用处(方法)
1976	组成美国 VLBI 网
1977	同步卫星传输数据的 VLBI 实验/实时相关(方法)
1978	混合图方法(方法)
1980	MIT/NASA MK II 记录终端(技术)
1981	超光速运动的可靠射电图像(天文)
1981	测出 H ₂ O 脉泽的自行, 发展了 VLBI 天体距离测量(天文)
1984	开始 VLBA 工程(技术和方法)
1984	全球 VLBI 实验(18 个台站联测/18cm)(方法)
1985	测出当代的大陆漂移(测地学)
1986	TDRSS 空间 VLBI 实验(方法)
1987	3mm 的 3C84 图像(方法和天文)
1989	1.3mm 的 VLBI 实验(方法和天文)

多。当然, 搜索条纹有时仍是费时的。研究者往往需要自己参加至少要关注条纹搜索工作, 而且要尽最大努力完成。(2) 图像处理耗时甚多, 混合图做几十个来回是平常的事, 数据校准精度不足也很费时间。研究者不但自己应通晓数据分析的基本理论, 而且还需要一定的经验和技巧。它实际上构成 VLBI 课题研究的一个组成部分。创新的处理方法仍在发展之中。这里我们作一个简单的回顾。洲际基线上的综合成图在 1977 年业已成熟, 发表了复杂的 3C147 的 VLBI 混合图^[9], 到 1981 年混合图或自校准法得到广泛的应用。1983 年 Schwab 和 Cotton 在条纹拟合中提出了综合条纹拟合法^[10], 以天线有关(antenna-related)代替了传统的基线有关(baseline-related)概念, 后者是在 VLBI 发展的头 17 年一直采用的。1988 年 Muxlow^[11]发展了“差分图像法”。相位基准法成图打开了对弱源做 VLBI 成图之门,

Alef^[12](1988)发表了间距为 0.5 的射电源对的相位基准法图像。“双解卷积法”用于多频率综合成图,当 VLBI 阵的基线已确定时,用多频率观测可以提高 uv 覆盖,方法的测试已有很好的结果,在改进 VLBI 图像方面可能很有希望。总的来说,VLBI 图像有可能达到 $10^6:1$ 动态范围,但需要解决的问题也不少,而消除 VLBI 数据中的非闭合误差占有重要地位。

表 4 VLBI 处理机容量

VLBI 处理机容量*									
N	$M=2$	3	4	5	6	7	8	9	10
2	1	3	6	10	15	21	28	36	45
3		1	3	4	6	7	11	12	17
4			1	3	3	4	6	7	8
5				1	3	3	4	4	6

* M =需要处理的台站数

N =处理机同时处理的台站数,例如上海天文台的 MK I 处理机同时处理 $N=3$ 个台站,5 台站数据要处理 4 倍观测时间。

综上所述,和传统的综合孔径射电望远镜(例如 WSRT, VLA)相比,虽然 VLBI 已从仅仅测量类星体的角径发展到对复杂射电源成图,取得很大进展,但仍有不少有待解决的问题,现归纳如下:

1. 灵敏度很不足,不能和传统综合孔径射电望远镜相比,利用 MK III 也只能检测到 0.1Jy ,而许多有兴趣的对象,如脉冲星、恒星都在 10mJy 量级,常常要用少数大天线加 MK III 终端才行。在一般的仪器水平上,只限于观测强源。

2. (u, v) 覆盖一般不能够满意地成图,而且短基线很缺,对源的伸展特征不利。由于动态范围不足,进一步限制了图中弱特征的检测。

3. 长基线上合适的校准源很缺乏,因此校准难做,比不上传统综合孔径。由于 VLBI 采用了闭合相位,源位置的信息丢失了,VLBI 图像中只给出特征的相对位置。因此致密成分相对于光学目标(例如类星体,恒星,星系)的准确位置是不知道的。

4. VLBI 处理很费时,而且至今未达到常规化,已如上述。

在和传统综合孔径比较的意义上,VLBI 尚未达到成熟的境界,它却一直得到大力发展,其原因是分辨率高,而只有这种高分辨率才能开创许多重要的天体物理学研究领域。另一方面,由于欧洲 VLBI 网和美国 VLBI 网投入常规性观测多年,VLBI 早期那种组织几个天线的实验方法已趋于过时。由于灵敏度的动态范围的限制,新的观测对象很少,但在观测过的射电源的基础上,已形成一些物理学专题,例如致密陡谱源(CSS)、视超光速源等。

这些有待解决的问题正是未来十年面临的挑战。除了软件(方法)不断发展以外,地面 VLBI 网的进展和空间 VLBI 可能使这种情况改观。

三、地面 VLBI 网的进展

从上面我们提供的材料可见,地面 VLBI 网的努力方向主要有:

改善(u, v)覆盖;
提高灵敏度;
多台站同时处理能力;
使用者服务(相关处理和校准)。

这些都是老问题。现我们从课题研究的要求出发, 列举 VLBA, 欧洲 VLBI 网的一些资料。

1. VLBA(Very Long Baseline Array)^[12]

美国 VLBA 将是世界上第一个 VLBI 专用设备, 它原本是为着天体物理而设计的, 后来, 多学科(天体物理、天体测量和地球动力学、大地测量学等)的课题论证表明, 虽然天线的分布位置是根据(u, v)覆盖的最佳设计, 完全为着天体物理, 但也完全适用于其他学科的要求, 而不必要有互相兼顾的考虑。

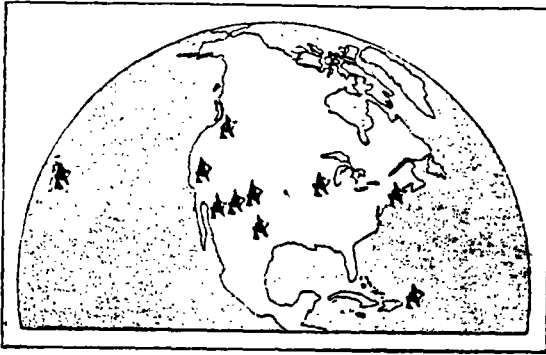


图 2 VLBA 的阵结构

(1) VLBA 的性能和特点

(i) 分辨率

其最长基线到 8 000 公里

(ii) 大视场(到图像中心的距离)

致密源往往比图像上的像素大许多倍, 特别在长波段、低亮度区域比较大。最小天线间距控制到 <200km, 并把 <200km 的基线放在靠近 VLA, 和 VLA 联网得到更短的基线, 即小于 35km。但 35km 到 200km

之间仍有空缺, 在新墨西哥再加三个天线将更理想, 这是将来的事。

(iii) 二维的布阵结构

有利于低赤纬源的成图, 至少到 -30° , 因为银心在 -28° , 而且天空的一半是在 $-30^\circ < \delta < 30^\circ$ 的范围内。

(iv) 图像质量

取决于动态范围, 也就是(u, v)覆盖的均匀性和充满程度。(u, v)覆盖图的“中央密

表 5 VLBA 接收系统的频率范围和系统温度

波段	频率范围 (GHz)	孔径效率	系统温度
330 P	.312— .342	.50	104
610	.580— .640	.49	64
1.5 L	1.35—1.75	.63	25
2.3 S	2.15—2.35	.70	28
4.8 C	4.6—5.1	.72	25
6.1	5.9—6.4	.72	32
8.4 X	8.0—8.8	.71	37
10.7	10.2—11.2	.71	36
15 U	14.4—15.4	.69	48
23 K	21.7—24.1	.66	87
43 Q	42.3—43.5	.51	125
89 W	867—927	.18	?

集”有利于射电源中所存在有几个亮特征和相应的伸展结构一起成图,并有利于空间一频率综合成图。对于相同数目的天线,“中央密集”结构比均匀结构提供更小的最小间距,可观测更大的源结构,这时图像的质量稍低些。

(v) 多台站相关处理

20 台站同时相关处理 190 条基线,允许 VLBA 和全球联网,一次处理。各台站的氢原子钟连续监测同步,因此二维条纹搜索将不必要,效率大为提高。特别是免费提供相关处理数据服务。

(vi) 连续谱、谱线和脉冲星、完全偏振观测能力

可选用 1 毕特和 2 毕特记录。对于连续谱,1 毕特最佳,而谱线观测 2 毕特更有利。有 8 个 IF 滤波器和 128 个谱线通道。并有脉冲星消色散处理功能。

(vii) 专用性和遥控

全部用于 VLBI 观测和研究,向全世界科学家开放。在 Socorro, NW 做遥控操作,可以临时改变观测程序,这使得观测诸如射电爆发之类的快速变化成为可能。

(2) VLBA 的多用途范围

连续谱天文学

谱线天文学

天体测量/测地学

偏振和脉冲星测量

作为空间 VLBI 地面阵

从表 5 可见,VLBA 的接收系统灵敏度平均比现有系统好几倍。系统灵敏度的提高不单是基线灵敏度提高,能观测到更多的致密源,而且将可能提供更多的基准源,从而可用相位基准法,得到更多的有用的 mJy 射电源图像,这是急待发展的工作。除灵敏度和动态范围提高外,作为专用网,能对一些天体有条件做重复观测,以跟踪其演化,这对一些类星体、星系核是必要的。多台站处理能力使频繁的观测成为可能。同时,可以进行大样本的系统观测,许多弱源会被选作观测对象。希望能观测到超光速运动中的某些成分在演化过程中的运动学性质,在不同频率上的观测也很容易实现。

谱线观测会找到新的对象,据认为 VLBA 的谱线处理能力快了 50 倍,这使原来令人生畏的谱线处理工作量大为缓解。具有方便的偏振观测能力,这是很重要的。预计可能观测恒星形成循环中的始末,从星际介质形成恒星到演化成红巨星,这些红巨星的质量损失再补充到星际介质。

在天体测量和测地学方面,VLBA 的应用也会很广泛。例如将会用 VLBA 测量大尺度的板块运动和形变,做 UT1 和极移服务。它可用于 GPS 测地系统的基本站,提供测地网的基本站。在基本天体测量方面,做河外射电源的参考系工作。它和行星际飞船相联系可比较不同的坐标系统。此外,VLBA 可对岁差、章动常数做独立的测量,测定地面坐标架,并测量它和射电源坐标架之间的关系。VLBA 还有条件综合出一个原子时的主钟,提供时间同步。表 6 列出 VLBA 工程的进展。

2. EVN(European VLBI Network)欧洲 VLBI 网

EVN 不是一个专用的 VLBI 网, 和现在的美国 VLBI 网一样, 每年观测四次, 每次约持续一个月。EVN 和 US VLBI 网一样, 由课题申请者提出一份观测的科学目的和观测方法的建议, 由一个小组评审, 评审结果用分数表示; 观测的安排将根据分数的多少, 得到观测时间后, 由申请者负责向各望远镜发出观测程序安排, 记录磁带则根据申请者要求寄到某个相关处理中心。相关处理以后的数据由申请者使用, 并永久保存。现在, EVN 面临的挑战是如何适应和满足增长的课题研究的需要。一个较大的行动是 1988 年向隶属欧洲共同体的委员会提出了装备一个 20 台站相关处理机的建议, 但目前尚未批准。此外, 肯定有一些大型天线将会建造起来, 接收系统和终端都会提高。表 7 是欧洲 VLBI 网和 VLBA 的比较。

表 6 VLBA 进展(1990.12)

项目/站址	PT	KP	LA	FD	NL	OV	BR	HN	SC	MK
20, 6, 4, and 1cm	A	A	A	A	A	A	4/91	9/91	1/92	5/92
Mark II 终端	A	A	A	A	A	12/90	4/91	np	np	np
VLBA 终端	A	A	A	1/91	1/91					
8BCC's(Mk II)	A	A	1/91							
双频 13/4cm	A	A	3/91	3/91						
90/50cm	A	A	1/91							
3cm	A	np	np	np	np	np	np	np	np	np
2cm	A									
7mm	A									
人员	A	A	1/91	7/91	1/92	1/92	1/92			

A 表示已具备
空白 表示日期待定
np 代表没有计划
VLBA 的计划是常常有
调整的, 从目前看有可能在 1993 年完成。

PT=Pie Town, NM
KP=Kitt Peak, AZ
LA=Los Alamos
FD=Fort Davis, TX
NL=North Liberty, IA
OV=Owens Valley, CA
BR=Brewster, WA
HN=Hancock, NH
SC=St. Croix, VI
MK=Mauna Kea, HI

表 7 EVN 和 VLBA 性能的比较

项 目	EVN	VLBA
改进(u, v)覆盖	*	**
灵敏度	**	*
波长范围	*	**
增加观测时间	*	**
多台站同时处理	*(*)	**

注: *(*)代表有计划, 但尚未落实

从目前看来, VLBA 占优势地位, 但 EVN 的大天线使它在全球 VLBI 网中有举足轻重的地位, 在(u, v)覆盖方面, EVN 和一些非正式成员联合起来, 除低赤纬不及 VLBA 外, 还是很不错的。EVN 和 MERLIN 联网也有很大的好处。

3. 其他

我们在文献[1]中已提及南半球的望远镜, 苏联、中国的望远镜, 以及空间 VLBI 的情

况, 此处不再重复。这里, 我们给出主要项目的进度, 列于表 8。

表 8 90 年代大型 VLBI 计划进展(1991.2)

名 称	完 成	规 模
VLBA(美国)	1993	10 天线(8000km)
VSOP(日本)	1995	远地点 20000km 近地点 1000km
Radioastron(苏联)	1994(?)	远地点 75000km 近地点 9000km

四、中国 VLBI 网的意义

中国 VLBI 网的建议书(1986 年 1 月)和总体方案(1986 年 8 月)的“科学目的”指出:“(1) 解决地球自转参数(ERP)测量的服务问题, 满足天体测量分支学科提出的战略目标; (2) 利用河外射电源建立天球参考系的研究; (3) 致密射电源的精细结构及其变化的研究。对于一些致密射电源最内层形态结构的研究, 需要高分辨率、高灵敏度和高动态范围, 国际 VLBI 协作是必要的。”因此, 中国 VLBI 网的主要意义是在地球动力学研究方面。

这里所规定的科学目的, 是根据天体测量分支学科的两次发展规划座谈会而确定的, 关于这方面的发展不属本文的范围, 由另文介绍。

就天体物理学研究范围而论, 上述目标尚没有过时, 当前的 VLBI 天体物理观测没有国际协作是不行的。在 VLBI 天体物理学的意义上三个天线网仅在初期曾经有意义, 而现在的作用却是有限的。在“建议书”中我们曾计算过德令哈 13.7m 天线的作用^[1], 但现在看来困难不少。后来我们也希望密云米波综合孔径作为一个 VLBI 米波单元, 但这在短期内也许不能实现, 因此, 单单靠国内三角网来做天体物理工作潜力不大。因为无论是灵敏度和动态范围都很明显不足。但国内天线的作用, 由于地理位置的关系, 可改善全球 VLBI 网的(u, v)覆盖, 因而是重要的。将来三个天线都可以和 EVN 和 VLBA 联网。课题申请者可向 EVN 和 VLBA 申请课题, 同时要求中国的有关天线参加, 这将是很有意义的。从目前 VLBI 网的情况看, 每年有四次联测, 每次最多一个月, 也许几天。

从发展来看, 从事 VLBI 天体物理学的研究者无疑应该去申请 VLBA, EVN 和全球 VLBI 的观测时间, 申请空间 VLBI 站的观测项目, 这是 1995 年左右的事情, 现在应加紧准备。VLBI 早期那种组织少数天线做实验的做法愈来愈少, 或者已基本结束, 而代之以从天体物理学课题出发申请已经常规化的全球 VLBI 网的观测和未来的 VLBA 观测。

中国 VLBI 网的另一个作用可能是进行一些试验性观测(所谓 PILOT 观测), 可以先在 2-3 个天线上做, 以后再提出申请全球 VLBI 网的项目, 这一定会增加得到支持的机会。

参 考 文 献

- [1] 万同山, 天文学进展, 8 (1990), 268.
- [2] Biretta, J. A., PH. D. Diss., California Institute of Technology.
- [3] Gwinn, C. R. et al. A. J., 91 (1986), 338.
- [4] Walker, R. C., Very Long Baseline Interferometry. Techniques and Applications, (1989), 163.

- [5] Rees, in IAU Symp. No. 119, p. 1, (1986).
[6] Preuss, E. et al., in IAU Symp. No. 121, p. 269, (1987).
[7] Unwin, S. C. et al., in IAU Symp. No. 129, p. 27, (1988).
[8] Perley, R. A., in Synthesis Imaging, Course Notes from An NRAO Summer School held in Socorro, p. 161, New Mexico, August, (1986).
[9] Wilkinson, P. N. et al., *Nature*, 269 (1977), 764.
[10] Schwab, F. R. and Cotton, W., *A. J.*, 88 (1983), 688.
[11] Muxlow, T. W. B., in IAU Symp. No. 129, p. 131, (1988).
[12] Alef, W., in IAU Symp. No. 129, p. 523, (1988).
[13] Wilkinson, P. N. et al., in IAU Symp. No. 129, p. 509, (1988).

(责任编辑 舒似竹)

Progress of VLBI Techniques and the Role of the Chinese VLBI Network

Wan Tongshan

(Shanghai observatory, Academia Sinica)

Abstract

We present a brief review of VLBI techniques and astrophysics and mention the limitations of current VLBI observations, namely, sensitivity, dynamic range and time consuming in imaging processing. It is expected that this situation will improve with the development of ground VLBI, Space VLBI and millimeter VLBI. Also mentioned is the role of the Chinese VLBI Network.