

射电源结构的研究和VLBI

吴盛殷

(中国科学院北京天文台)

提 要

在短短十九年里, VLBI技术已经发展为具有毫角秒高分辨率成图观测能力的独一无二的技术, 对天体物理研究作出了相当大的贡献。VLBI系统将成为今后十到十五年里最有希望和最重要的射电天文观测设备。

本文从回顾射电望远镜发展的简史出发, 说明VLBI已日益成为射电观测手段的主要发展方向之一; 文章总结了VLBI功能发展的现状及其在主要探测领域——致密射电源的研究中所得到的观测结果的概貌, 阐明在这样的背景和基础上, VLBI进一步发展的方向; 最后简单介绍今后十来年里可能发展或建成的VLBI系统。

一、历史的简单回顾

传统式射电望远镜(指抛物面, 抛物柱面或球面等单个连续孔径射电望远镜)和非传统式(指各种干涉仪, 综合孔径和VLBI等)射电望远镜的某些典型代表, 以及观测到的主要天体物理结果, 以扼要编年的形式列于下表。表中1960±及1960s分别表示1960年前后及六十年代。

年代	传统式	非传统式	天体物理结果
1930s	Jansky可转框架 Reber 9.1m		银河射电 太阳射电
1950±	JB 76m	二元 } 多元 } 干涉仪 复合 }	“射电星”(河外射电源) 展源 双源 ⁽²⁾
1960±	Parkes 64m	综合孔径方法	类星体 ⁽¹⁾ 脉冲星
1960s	Goldstone 等处多个 64mRTs Kitt Peak等处多个毫米波 RT Arecibo 305m	Cambridge等处多个综合孔径 系统 首次 VLBI试验	双瓣射电源 ⁽¹⁾ 微波背景辐射 射电分子谱线 射电星
1970±	Effelsberg 100m	Westerbork Fleurs 综合孔径	头尾星系 ⁽²⁾ 致密射电源

1986年5月5日收到。

1970s	毫米波射电望远镜(RTs) 25m RTs ⁽³⁾ 空间RT	多站VLBI 试验 ⁽¹⁾ HYBRID 成图 ⁽¹⁾ MERLIN VLBI 网: ⁽¹⁾ UVN(美) EVN(欧)	(CRS) ⁽²⁾ 低频变源(LFV) ⁽⁴⁾ 喷流(jet) ⁽²⁾ 双类星体(DQSO) ⁽²⁾ 银河 maser 源 ⁽²⁾ 视超光速运动(SLM) ⁽⁴⁾
1980± -1985	Nobeyama 45m Pico Veleta 30m毫米波 RTs USSR 70m ⁽³⁾ Medicina 32m ⁽³⁾	VLA mm 综合孔径或干涉仪 USSR VLBN ⁽¹⁾ m VLBI (T) ⁽¹⁾ mmVLBI (T) ⁽¹⁾	瓣优势源(LDS) ⁽²⁾ 核优势源(CDS) ⁽⁴⁾ 核-喷流结构 ⁽²⁾ 致密双源(CD) ⁽²⁾ 陡谱致密源(SSC) ⁽⁴⁾ 甚致密源(VCS) ⁽²⁾ 谱指数及偏振的高分辨图 ⁽⁴⁾
未 来			预期课题
-1990	Sub m m RTs	AST m/mm VLA mm VLBN ⁽¹⁾ m VLBN ⁽¹⁾	南天源结构 ⁽²⁾ 低/高频大尺度 结构 ⁽²⁾ 喷流的喷嘴 ⁽²⁾ 中分辨率晕、喷流或瓣 ⁽⁴⁾
1990s		VLBA ⁽¹⁾ CLBA ⁽¹⁾ 空-地VLBI系统: ⁽¹⁾ QUASAT RADIOASTRON	视超光速源 (SLS)的分类 ⁽²⁾ 节的径迹及演化 ⁽⁴⁾ AGN(活动星系核)的能源 ⁽⁴⁾ 吸积盘 ⁽²⁾
2000s		空间VLBA ⁽¹⁾ ASTRO-ARRAY	高低频极限的超高分辨率 ⁽²⁾

表注: (1) 七十年代后期开始, VLBI 日益成为发展射电天文观测设备的一个主要方向。

(2) 所有这些天体物理成果或课题都在不同程度上主要依靠非传统式射电望远镜的观测。

(3) 事实上从七十年代后期以来, 几乎所有25米以上的射电望远镜都配备了 VLBI 接收记录设备参与 VLBN 的观测, 而八十年代里建成的传统式射电望远镜(除 mm RTs 外)都主要用于 VLBI。

二、进一步发展的背景

1. VLBI的现状水平^{[1],[2]}

将 VLBI 的若干主要性能、目前达到的水平及必要的注解列于下表, 以阐明目前的概貌。

性 能	现 状	注 解
波长 λ (cm)	2.8, 6, 18, 21, 1.3, 3.8, 50, 91, 0.4, 0.7,	系统观测主要集中在厘米及短分米波段。 一般不能同时观测。
分辨率AR(mas)	100~0.1	$AR \approx 0.5 \frac{\lambda}{D} = (\lambda/\text{cm}) / (D/1,000\text{km})$

最大可测亮温度(K)	$4 \times 10^{11} \cdot (D/10^4 \text{km})^2 \cdot (S_v/J_v)$	来自可测源角径下限。
定位精度(arcsec)	3×10^{-3}	
相对定位精度(arcsec)	$\leq 4 \times 10^{-3}$ (在 $0^\circ.5$ 内) $< 10^{-3}$ (在 $0'.5$ 内)	一般采用相位基准法。这里用1986年所得数据, 文献 [1], [2] 中所给较差。
灵敏度 S_{\min} (mJy)	典型值: 5—Mk I 1—Mk II (相关流量密度的中值噪声) 成图源强度: ≥ 500 (Mk I) ~ 20 (Mk II + 全条纹拟合)	$S_{\min} = 2 \times 10^4 k \eta^{-1} \left(\frac{A_1 A_2 2BT_c}{T_{s1} T_{s2}} \right)^{1/2}$ 对某个干涉仪对而言。 S_{\min} —最小可测相关流量 k —Boltzmann常数 A_1 —天线有效面积 T_{s1} —天线系统温度 B —带宽 T_c —相干积分时间 η —数值处理损失因子
相干积分时间 T_c (秒)	30—900 (1200)	$T_c = \alpha \left[2\pi\nu \left(\frac{\Delta\nu}{\nu} \right) T_c \right]^{-1}$ $\alpha = 1.177$ —50% 相干损失 $\alpha = 0.21$ —10% 相干损失 $\alpha = 0.446$ —20% 相干损失
动态范围	一般 20:1—100:1 已达1000:1	这是采用自校准技术达到的结果。一般情况其限制因素为: 传播中的相位噪声和强度起伏; 剩余钟差、源位和基线差及其不确定性; 不连续延迟跟踪; 校准误差及其不连续性。
测偏振能力	较差、较困难, 仅有初步结果。	仅有少数试验性观测得到 mas 尺度的偏振结构 (3C 454.3, OJ 287)。
谱线观测能力	一般具备。	主要用以观测宇宙 maser 源的高分辨结构。
mas 结构的谱指数成图	较困难, 仅有初步结果。	较理想的条件是: 有同样分辨率的(准)同时双频观测 (已得1038+528A、B及3C 84)。
组网情况	USN(7—12站) EVN(6—9站) USSR(<6站?)	已经进行了高达18个站的全球 VLBI 组网观测。
成图视场 FV	$\sim 10 \text{mas} \times 10 \text{mas}$ $\sim 400 \text{mas} \times 500 \text{mas}$	视场限制因素主要是: (a) UV 覆盖的空洞 (b) 中频带宽及相干积分时间 如 (a): $FV \leq \left[\frac{N(N-1)}{2} \right]^2 \cdot B_{FWHM}$ 其中 N 为观测站数 B_{FWHM} 为活化束半功率立体角
处理机	Haystack (I-4) NRAO (I-3) CIT (I-10, II-5) MIP (I-3, II-4) Japan (K-3) USSR (I-2) Shanghai (I-3)	I-3代表能同时处理三站磁带的Mark-I处理机 II-5代表同时处理五站数据的 Mark-II 处理机。 日本的K-3处理机类似于Mk-II, 与Mk-II兼容。
算法	混合成图, 利用闭合参数的自校及全条纹拟合技术结合起来可达 20mJy 的成图灵敏度。	这是目前流行且已证明有效的算法。有人在研究其他的算法, 如最大熵成图 (MEM) 等, 但难以作出比较其优劣的评价。

监测能力	差：每年3—4次，约30%的观测时间用于VLBI。	观测时间有限，每一观测时间只能在有限几个频率中选一个，由于采用非专用射电望远镜，同一课题不同历元的观测，所能用的VLBI网及其性能难保证一致。
------	---------------------------	-------------------------------------------------------------------------

2. VLBI 在天体物理研究中主要结果和问题

(1) 主要对象

典型的河外射电源如图 1 所示，它包含延伸达 100kpc—Mpc 尺度的射电瓣(lobes)，瓣中亮度突出的区域——热斑(hot spots)，连结源中心与瓣的长而窄的发射区——喷流(jets) 以及尺度典型值仅为(pc)的相当致密的核(nucleus)。后者常称为致密射电源(CRS)或“活动星系核”(AGN)。

可以是星系、类星体或 BL Lac 源的“AGN”有如下典型性质：

角大小： $\theta \ll 1''$ ；

亮温度： $T_b \geq 10^{11} \text{K}$ ；

可变性：变化时间尺度 $\tau \sim$ 年或更短；

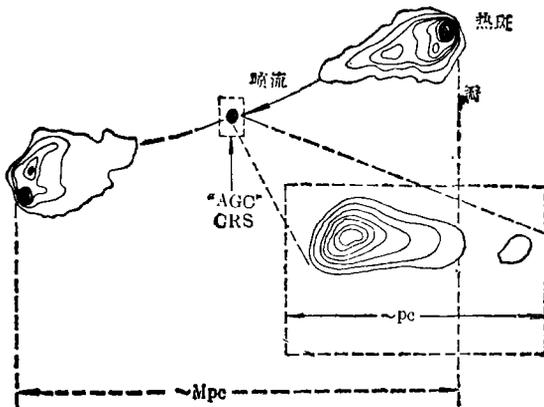


图 1. 河外射电源的典型结构示意图。图右下侧标出一种可能的“AGN”的毫角秒结构——核-喷流结构。

距空间范围内结构的独一无二的技术。以工作于 1.3 厘米波长的 Effelsberg-OVRO 基线为例，基线长约 8,200km, $\text{AR} \approx 0.16 \text{mas}$ ，在 $H_0 = 50 \text{kms}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 的假设下，对不同源可探测发射区域的大小如表 1 所示^[1]。

可见对 $D \leq 100 \text{Mpc}$ 的河外源，VLBI 对探测如吸积盘、喷流的喷嘴等尺度的基本区域是灵敏的。考虑前述 VLBI 的成图视场尺度为 10—400mas 及 AGN 的典型性质，就不难理解，尽管 VLBI 曾用于观测宇宙 maser 源、SS433、射电双星甚至太阳活动区等银河内源，但其最主要和最能发挥其潜力的研究领域是活动星系核——AGN。

(2) AGN 的某些主要 VLBI 观测结果

这里要综述 AGN 的全部射电观测结果是不可能的，文献[5]·[6] 对此有较全面的评述。下面仅试图用最简单的形式勾画出主要观测结果及存在的问题。

表 2 按 AGN 的小尺度结构分类列出 VLBI 在此领域的主要观测现象^{[6]·[7]} 及问题。

频谱：平坦谱或有转折频率的峰状谱。射电巡天表明^{[3]·[4]}，即使约 50% 的陡谱源（包括部分陡谱致密源[SSC]及瓣优势源[LDS]）大都含有来自致密核的 $\geq 6 \text{mJy}$ 的辐射，更不用说另外 50% 的核优势源(CDS)了。可以说，基本上所有的河外射电源都与 AGN 相联系。

另一方面，和经典的单镜面抛物面射电望远镜(最好分辨率达到数十角秒)及综合孔径射电望远镜(最好分辨率达到亚角秒—— $0''.1$)相比，VLBI 是迄今能以亚毫角秒分辨率直接探测到亚秒差

表 1 Eff—OVRO基线的VLBI在1.3厘米对不同源可探测区域的大小

源	距 离 (设 $H_0=50\text{kms}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$)	对应 $AR\approx 0.16\text{mas}$ 的大小	
		厘 米	秒差距(pc)
M81	3.25 Mpc	7.9×10^{15}	0.0025
M87	21.9 Mpc	5.3×10^{16}	0.017
NGC1275	110 Mpc	2.6×10^{17}	0.085
3C147	$Z=0.595$	3.7×10^{18}	1.2

表2 AGN的小尺度结构分类及现象

分 类 现 象	经典双源 中央成分 (CCB)	陡谱致密源 (SSC)	核优势源(CDS)		甚致密源 (VCS)	复杂源(未分类) (UCS)
			不对称(C型)	对称(S型) (CB)		
形 态	瓣-核-瓣	核及致密包层	核-喷流(瓣)	双核	核(区)	多致密成分, 多轴?
频 谱	陡 谱 (SS)	陡 谱 (SS)	平坦/成峰 (FS/PS)	成 峰 谱 (PS)	成 峰 谱 (PS)	成 峰 谱 (PS)
流量变化 高/低频	弱	弱 低 频	较 强 高/低频	少 变 高 频	强 高 频	
变化时间尺度			年、月一周、日	年、月	年、月	
角秒—分级 展 结 构	强, 常为 对称双瓣	较强, 延展有限	大多有、低亮度	无 AS 结构	大多有, 弱	
致密成分	有, 较弱 一般不对称	有, $0''.1-0.5\text{mas}$	有	有, 相间 $20-30\text{mas}$	有, 集中 95%以上流量	
VLBI 核-喷流结构	大多有	无	有	无	无	
方向角 (PA) 改 变	从mas—as $\Delta PA < 5^\circ$	不同尺度 PA 显著不一致	mas—as 连续变化 $\Delta PA \geq 30^\circ$			
偏振 VLBI 图			1—8% 3C 454.3 OJ 287	$< 0.5\%$	1—8%弱	
谱指数 VLBI 图			1038+53A, B			3C 84
光学证认	星系, 类星体	类星体, 星系	BL Lac, 类星体 Seyfert 星系	星系, 类星体 光学弱区(EF)	类 星 体 BL Lac	类星体, 星系 BL Lac
结构变化 视超光速 (SL) 或亚光速 (Sub L)	SL-3C179 3C390.3	SL-3C147	SL-3C 273 3C 345 BL Lac 1928+73 3C454.3 1642+69 3C 279 3C 120 NRAO 140 0735+17 4C 39.25	SubL- 2134+004		SubL-3C 84

关于 SL 源问题	3C 179是此类中独一无二的 SL 源吗?	3C 147可能是SL源?	SL与非SL源? 3C 345 各节有不同径迹和视速度吗? 3C 454.3是特殊一类SL源吗?	膨胀还是收缩?		
模 式		粒子流与周围稠密介质作用?	粒子流(或相对论团块)沿视线方向运动?			往往不同频率不同尺度呈不同形态,是单独一类吗?
	存在一个统一模式(Unified Scheme)吗?					
一个巡天 ^[6]	3	6	13	6	9	8
小 统 计	30/45=67%=QSO+BL Lac					
45/65	14/45=31%=Galaxies					
VLBI成图	1/45=2%=E. F. (空域,光学暗区)					

可见,在藉助VLBI加深了对射电致密源了解的同时,观测还提出了更多有待解决的问题。诸如射电强类星体或星系核与射电宁静源间有没有本质差别、是否可用统一模式来解释不同类射电致密源呈现的不同现象、类星体 3C 454.3 的视超光速运动与其他SL源的特殊性有无区别、对 3C 345 喷流中不同“节”的演化的系统监测能引出什么样结论等,这些问题的解决寄希望于未来VLBI的发展。其发展的方向应该符合下列要求:

(i) 配置专用和固定的VLBI天线和VLBI网,使之具备更强的对特定源的某些特征作系统监测的能力。

(ii) VLBI阵或网应具有更高的动态范围及更好的成图质量,这是监测某些弱成分(如“节”)所必需的。

(iii) 进一步提高VLBI的偏振成图及谱指数成图的能力,使之更广泛用于许多源。

(iv) 能进行更高角分辨率的成图观测。

(v) 尽可能宽的频率覆盖,特别注意目前缺乏系统VLBI成图观测的毫米波及米波段。

三、未来十年的VLBI

1. 毫米波及米波VLBI网

(1) 科学意义

过去十八年,VLBI的观测特别是成图观测主要集中在厘米波段。近几年来,虽然成功地进行了多站VLBI的毫米波及米波试观测,但还未能得到更多源的高可信的VLBI图像^{[9], [10]}。

毫米波VLBI不仅给出最好的分辨率,而且如3C 84及3C 273那样的具有平坦谱和流量变化的源,在3cm和6cm波长是不透明的,在毫米波段却变成透明的,可以作更深入的探测,例如可探测到喷流顶点(apex)等更接近中央能源的区域。对3C 84那样较邻近我们的源,甚

至可最终探测到设想中的吸积盘的发射和分布, 毫米波 VLBI 的观测, 也可以揭示那些和光学变化更密切相关和同步的射电特征; 此外, 毫米波 VLBI 与 X 射线的协同观测有助于弄清由逆康普顿发射产生的 X 射线源与毫米波强源间可能存在的相关。

对河外源的低频高分辨率研究也十分重要, 特别对了解能量如何从中央“发动机”向遥远外区(喷流, 节、瓣及热斑)输送的物理过程; 对区分射电源自身的同步加速自吸收效应和周围电离气体产生的自由-自由吸收效应(这些效应是频率相依的)以及对了解低频变源的角尺度从 10mas 到数百 mas 的结构, 在揭示其亮温度(从流量变化的时间尺度推出)可能超过逆康普顿限—— $10^{12}K$ 之谜的研究中, 有 1—100mas 分辨率及 10—1,000mas 视场的米波 VLBI 将是很有意义的。

(2) 发展条件

毫米波 VLBI 的关键是保持相干性和灵敏度, 为此需采用宽带 Mk-III 记录及处理系统, 有良好相位稳定性的毫米波接收机及频率标准, 有尽可能大孔径的毫米波望远镜, 或以若干大天线为中心配以全条纹拟合(Global fringe fitting)技术改善信噪比, 尽可能在各站配备先进的水汽辐射计以改正对流层引起的相位起伏。目前, 因为 Nobeyama 45m、Pico Veleta 30m 及一批 10 米以上毫米波望远镜的建成, 这些条件都具备了。

米波 VLBI 对频率标准, 接收机及记录处理带宽的要求较低, 加上已有了如 Westerbork 扎结阵(tied array)、印度 Ooty 抛物柱面等创造或利用大接收面积天线的经验, 利用较小投资及已有低频天线阵或望远镜, 组成米波 VLBI 网是可能的。

(3) 可能的毫米波及米波 VLBI 网

借用[9]中的 10 米或更大的毫米波射电望远镜的分布图, 并补充以潜在的毫米波及主要米波望远镜, 得到图 2, 用以表示将来可能形成的毫米波(用“●”表示)及米波(用“○”表示) VLBI 网。有的望远镜(如西德的 100 米, 及美国拟建的 VLBA 天线)可以从 7mm 波长工作到 92 cm 波长, 当然可以同时列入两种网, 用“⊙”表示。

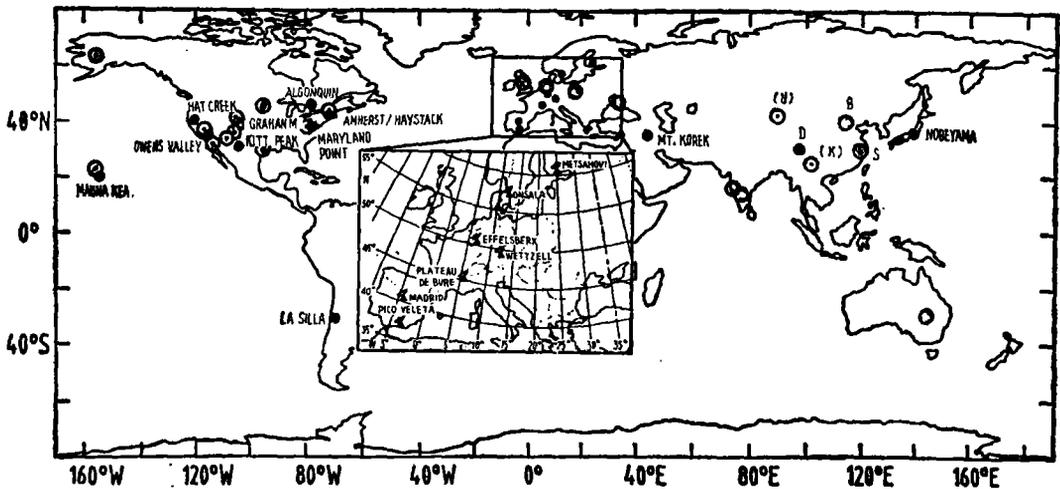


图 2. 将来可能组成的毫米波及米波 VLBI 网。毫米波网点用“●”标出, 米波网点用“○”标出。⊙表示可以从 7mm 工作到 92cm 的望远镜, 在组网观测时既可作毫米波 VLBI 网, 也可作米波 VLBI 网的一站。

2. VLBA^{[11], [12]}

VLBA 是美国专用甚长基线阵的缩略表示, 这个系统的提出始于1974年的可行性研究, 经过1979年—1981年三年的设计研究后, 美国国家科学院天文观测委员会(ASC)推荐它为最优先的大型地基天文设备。1982年5月 NRAO向美国国家科学基金会(NSF)提出 VLBA 的设计、建造及工作建议。1983年 NSF 批准约 8 千万美元的拨款以建造 VLBA, 预计 1992 年完成。

VLBA 的设计原则是在预算可能限制下, 使之成为有最佳可能分辨率、灵敏度、动态范围及成图质量的、有最大频率覆盖的、专用和统一管理的甚长基线阵。

(1) 组成及预期性能

拟建造的甚长基线阵由十面 25 米直径的地平式抛物面天线组成, 原计划天线配置在从 Alaska, Hawaii 到 Puerto Rico 的美国本土内, 如图 3 所示。后拟将两面天线放在 New Mexico 州靠近 VLA 的地方, 其余八面分别置于 Massachusetts、Washington、Iowa、Texas、Arizona、California、Hawaii 洲及 Virgin Islands。

两个天线安置在新墨西哥州使其与 VLA 的基线在一定程度上填补了 VLA 及 VLBA 间基线的中间空隙。今后如能再在该州加装三面天线, 就可以取得从 VLA 的 D 模式到 VLBA 最大八千公里基线的连续覆盖。而且此二天线之一(位于 VLA 中心以南 70 公里)可以作为 VLA 的一部分工作, 使 VLA 的分辨率提高一倍。另一方面 VLA 可以作为 VLBA 的一部分工作, 这将使 VLBA 的灵敏度及成图视场增加。

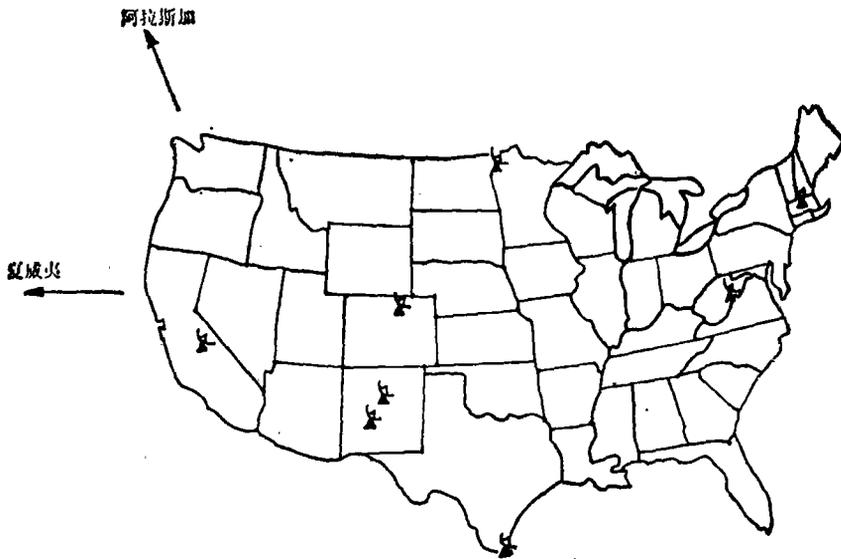


图 3. 一种可能的 VLBA 天线配置图。

VLBA 的预期灵敏度及分辨率列于表 3。

相关处理机对通常的连续谱工作模式, 可以同时处理来自多达 19 个天线的的数据, 对偏振测量的处理可以同时作 14 个天线数据的相关。此外, 该系统可以高达 512 信道、频率分辨率达 62 Hz 的能力作谱线观测的处理。这确实是省时间、留有发展余地、有 VLBI 偏振及谱线处理

能力的处理系统。

表 3 VLBA 的预期灵敏度和分辨率

频率 (GHz)	馈源 (注1)	效率	接收机 (注2)	系统温度 (K)	典型相干时间 (秒) (注3)	灵敏度 (注4) (mJy)	分辨率 (mas)
0.325	PF	0.31	GASFET(a)	65	100	0.80	24.0
0.611	PF	0.47	GASFET(a)	55	200	0.50	13.5
1.4/1.7	SF	0.58	GASFET(c)	29	1200	0.18	5.4
2.3	SF	0.69	GASFET(c)	31	1000	0.18	3.5
5.0	SF	0.69	GASFET(c)	37	500	0.19	1.60
8.4	SF	0.71	GASFET(c)	40	280	0.23	0.90
10.7	SF	0.70	GASFET(c)	45	230	0.26	0.75
15.0	SF	0.67	GASFET(c)	65	160	0.20	0.54
22.0	SF	0.61	GASFET(c)	45	110	0.31	0.35
43.0	SF	0.35	SISmixer	75	60	0.80	0.20

表注(1) PF——原焦配置, SF——二次焦点配置。

(2) (a)表示常温, (c)表示致冷到20K。

(3) 这是典型对流层及电离层的相干时间, 可能情况下采用HEMT放大器。

(4) 这是用全部阵作八小时相干观测, 并取5倍噪声中值计算的灵敏度。当VLA用于VLBA时, 灵敏度还可提高5倍(当然必须采用包括全条纹拟合——GFF的自校准技术)。

记录系统通常带宽为50MHz(数据率100Mbps)在某些特定的有限期间, 为了高灵敏度观测的需要, 可工作在100MHz带宽(数据率达200Mbps)。

(2) 将来可能的扩展

VLBA可以进一步扩展以改进灵敏度、分辨率及动态范围。在南美洲加一面天线可以大大改善N—S方向分辨率, 和太平洋地区一些已经或将要建成的天线, 如日本的45米毫米波天线、澳大利亚的AST及我国上海的25米天线, 进行条件允许的部分协同观测, 也将改善VLBA性能。

更快的扩展途径是让一些大射电望远镜, 如VLA、Arecibo 305m和Bonn 100m与VLBA共同观测, 还加上计划中将在加拿大建造的以及在意大利建造的VLBI天线, 就可以既提高角分辨率及成图质量, 又大大提高了灵敏度。

3. CLBA^[13]

1978年, 一个建立加拿大长基线阵(CLBA)的建议提交加拿大天文学会(CAS)的某委员会, CAS强烈支持该建议并推荐CLBA为加拿大最优先的天文新设备, 组织了CLBA计划委员会进行设计研究, 1982年提出设计报告。1983年中加拿大国家研究委员会正式批准了这项国家设备计划。但最近得知, 加拿大政府已将此计划搁置。

(1) 组成及预期性能

CLBA将由九面32米直径的抛物面天线组成, 其中八面基本上以直线阵形式排列在加拿大南部, 从Newfoundland到British Columbia的地区, 另一面拟设于西北部Yellowknife处。两种可能布局列于图4。这种基本直线排列的布局是由维修方便、视场宽阔及对低纬源有不

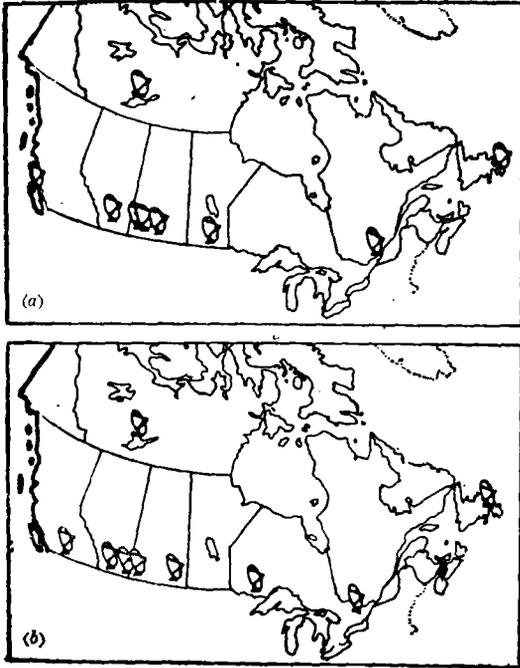


图 4. 两种可能的阵布局方案 J3M(a)及 P10(b)。阵P10将利用现有在Penticton, B. C及 Algonquin Park, Ontario的两射电望远镜站址(但不是射电望远镜本身,以保证各阵元性能一致。)

太坏的覆盖等多种因素折中考虑的结果。

CLBA 的预期灵敏度及束宽列于表 4, 表中两组灵敏度数据分别代表单对天线 ($N=2$)及整个线阵 ($N=8$)的相干工作的情况(用于天体物理)。

CLBA 的其他主要性能指标列于表 5。

(2) 可能的发展

与法国正计划建造的一个 32m 天线合作观测, 可以使系统分辨率数据降为表 4 所列值的 2/3。天线经进一步改进工作到 43GHz, 则可使 CLBA 在该频率的分辨率达到 0.174 mas。表 4 所列灵敏度都是利用制冷到 20K 的 FET 接收机(除 0.611 GHz 用常温 EET 外)得到的, 如进一步采用 Maser 接收机于 22GHz, 则可大大提高该频道的灵敏度。

4. QUASAT 计划^[14]

1982年美、欧洲射电天文学家在法国 Toulouse 集会, 一致支持发展空间 VLBI 并决定向 ESA (欧洲空间局)和 NASA(美国国家航空和宇航局)提交联合建议。名为 QUASAT 的联合任务书得到了 ESA 及 NASA

的赞成, 并于 1983 年 10 月开始在两个空间机构进行正式的费用估算研究。

表 4 CLBA 的预期灵敏度及束宽

频 率 (GHz)	灵 敏 度 $N=2$ (mJy)		灵 敏 度 $N=8$ (mJy)		方 向 束 宽 (mas)
	$\tau=1^a$	$\tau=15^m$	$\tau=15^m$	12^h	
0.611	90	3.0	0.57	0.082	12.2
1.5	41	1.4	0.26	0.037	5.0
2.25	45	1.5	0.28	0.041	3.3
5.0	51	1.7	0.32	0.046	1.5
8.3	70	2.3	0.44	0.064	0.9
10.7	76	2.5	0.48	0.068	0.7
22.0	473	16.0	3.0	0.43	0.34

(1) QUASAT VLBI 系统

QUASAT VLBI 系统的示意图如图 5 所示。它由送入近地点约 5,000km、远地点约 15,000 km 的 15—20m 轨道天线, 与地面 VLBI 阵、网和站组成一个全球性的 VLBI 系统。地面上原子钟提供的本振频率, 空间天线接收的数据以及对空间天线的遥测、监控指令都通过空间天线与地面上遥测站(包括 NASA 的 DSN 及 ESA 的遥测网)间的中继通道直接联系。传到地面遥测

站的中频数据如通常的 VLBI 站那样记录在磁带上, 再将这些磁带和其他地面站的磁带一起送到中央处理设备进行相关和校正处理。这样初步处理过的数据再送给课题主要研究者。

表 5 CLBA 的其他性能指标

基线范围	75km~5,000km
可测源大小	1.0 arcsec (2.2GHz), 0.1 arcsec (22GHz)
成图动态范围	≥300
天线效率	$\eta \geq 70\%$
最高工作频率	22GHz, 可改进到43GHz
记录系统	二信道, 4录像机/信道, 数据率96Mbps
相关系统	同时处理高达10个天线数据; 4偏振参数处理, 各有32个延迟通道, 2048谱线信道的处理能力。

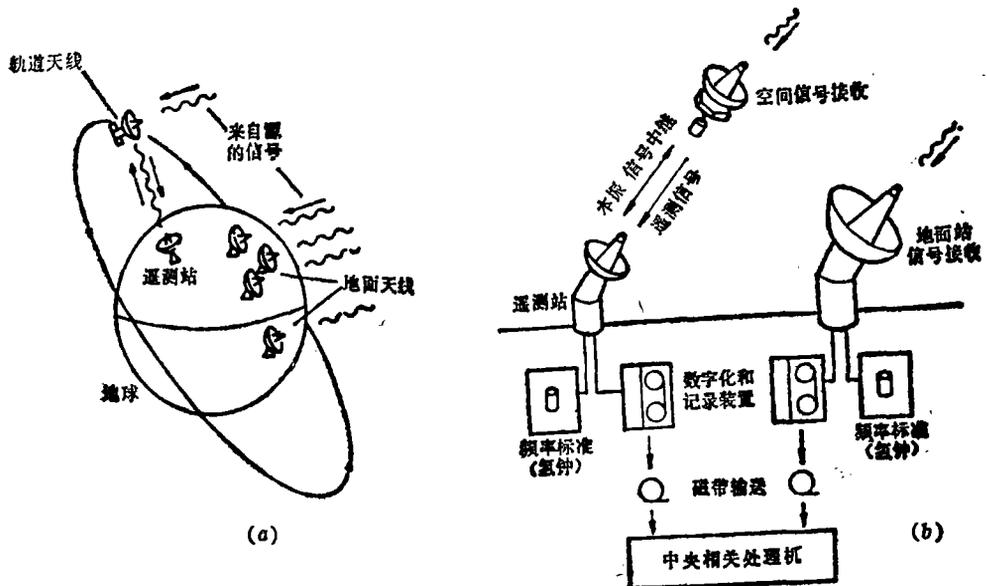


图 5. QUASAT VLBI 系统的示意图 (a) 及框图 (b)。

QUASAT 计划的主要技术要求如下:

(i) 接收机——制冷可同时工作于下述频率的任意两个处。

K 频带—22GHz $T_s \leq 200K$

C 频带—5GHz $T_s \leq 75K$

L 频带—1.7GHz $T_s \leq 40K$

(ii) 偏振——同时观测左、右圆偏振(LCP + RCP)。

(iii) I.F. 系统——带宽至少20MHz, 在要求高灵敏度时可扩大使用到50MHz。双通道 I.F. 系统用以保证能同时观测二频率或二偏振。

(iv) 轨道参数

最大轨道半主轴在足够高分辨率及U-V覆盖上不致产生大空洞的两点要求之间取折中, 轨道平面选择在轨道平面垂线的 $\pm 45^\circ$ 观测可以覆盖尽可能大天区。

最后选定参数：远地点 15,000km, 近地点 5,700km, 轨道倾斜 45° — 63° 。

(v) 轨道知识

为了使 QUASAT 基线观测的剩余条纹率及延迟进入中央处理设备(CPF)的标准窗口, 要求轨道天线位置误差 $\leq 100\text{m}$, 速度误差 $\leq 10^{-2}\text{m/s}$ 加速度误差 $\leq 2 \times 10^{-7}\text{m/s}^2$ 。

(vi) 成图时间

典型成图周期为 24^{h} — 48^{h} , 但取决于科学目标, 某些观测成图时间只要数小时。

(vii) 观测方向

典型观测方向大体垂直于轨道平面。

(2) 主要优越性及某些系统性能

(i) 更高的角分辨率

因最大基线比地基 VLBI 的基线长 3 倍以上, 所以分辨率也至少提高了 3 倍, 如在 1.35cm 波长, 束宽仅为 60 — $80\mu\text{as}$ (微角秒), 对应银心处 1A.U. 大小的区域, 在 $Z=1$ 的射电源上, 可分辨 0.5pc 大小的区域(设 $H_0=75\text{kms}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$, $q_0=0.05$)。

(ii) 良好的 UV 覆盖

QUASAT 计划中的轨道天线与地球的相对运动可提供非常稠密的 UV 覆盖。事实上在该天线周期与地球自转周期未达到一个公倍数时, 它每转一周, 都在 U-V 平面上提供新的空间频率。由此带来的好处是明显的: 由 UV 覆盖空洞所支配的成图视场比地基阵明显加大; VLBI 成图处理中的超分辨率成为可能, 与地基 VLBI 相比, 采用超分辨率技术至少提高分辨率 30%, 低旁瓣使数据校准残差的效应降低, 所得到射电源的图形更可信。图 6 表示出 VLBA 及 QUASAT + VLBA 的图像恢复能力, 其中图 6a 是试验的源模型。可以看出 QUASAT VLBI 系统对源的极致密的细节, 有很好的成图能力^[15]。

(iii) 天空覆盖

现有的以及还在计划中的 VLBI 阵或网的共有缺陷是 E-W 尺度约二倍于 N-S 尺度, 对 $|\delta| \leq 30^{\circ}$ 的源 N-S 方向分辨率约降低 2 倍。而 QUASAT VLBI 系统无论源的赤纬如何, 都产生 E-W 及 N-S 差不多的空间频率, 故在全天空有好的 UV 覆盖。

(iv) 快速成图

QUASAT 计划中轨道天线每运行一圈与地面阵组成的 VLBI 系统都可在 U-V 平面得到相当面积的覆盖, 可以对数据进行成图处理, 得到一幅不十分精细的图。因此可用来监测如 SS 433 那样在数小时内有明显变化的耀爆源的结构演化。

(v) 灵敏度

在 1.35cm 对 250mJy 的源, 经过 24 小时观测, 可以达到 100:1 的动态范围, 在 6 及 18cm , 对 50mJy 的源, 可达到同样的动态范围。从源的计数可知, 在 1.35cm 可成图观测的致密源约一千个, 在 6 及 18cm 约一万个。

可见 QUASAT 的缺点是灵敏度较差及寿命有限(2—5 年), 当采用大地基天线(如 100 米, VLA 及 Westerbork 阵)时, 灵敏度可以提高。

5. “RADIOASTRON” 计划^[7]

这是苏联提出的一个空间 VLBI 计划, 基本原理同 QUASAT, 但它包括两个轨道天线,

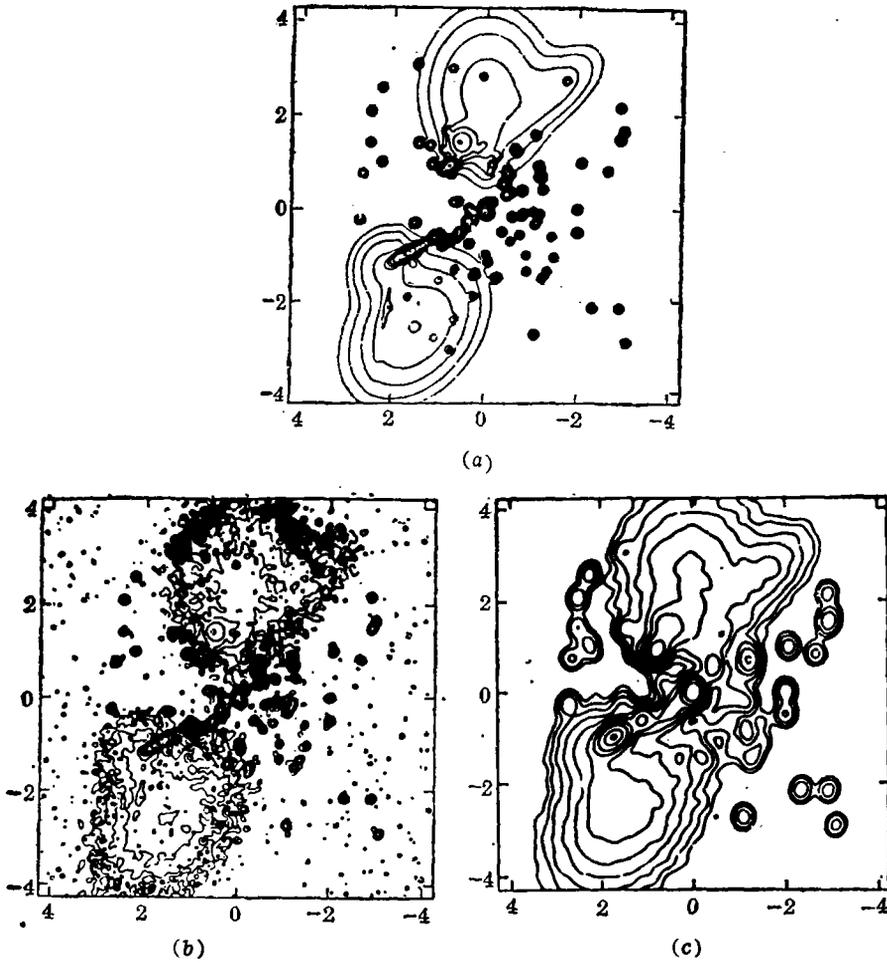


图 6. (a) 源的初始试验模型。该源延伸 8mas, 既包含致密及延展特征, 又包含了一些分立的致密特征; (b) 设源处于 $\delta = +45^\circ$ 时 VLBA 的成图; (c) $\delta = +45^\circ$ 时 QUASAT+VLBA 的成图。

下表列出其主要预期性能。

轨道望远镜		频率 (GHz)	分辨率 (mas)	空间-地面二元干涉仪			寿命
直径	远地点			灵敏度	带宽	积分时间	
10m	$\sim 10^6$ km	0.4	0.7	0.2Jy	2MHz	60s	2年
10m	$\sim 5 \times 10^5$ km	1.7	0.2	0.013Jy	32MHz	10 ³ s	?
		5.0	0.06				

和 QUASAT 相比的主要优缺点是:

- (1) 若采用苏联现有的 Mk II VLBI 系统, 则灵敏度很差。
- (2) 分辨率比 QUASAT 计划高。
- (3) 成图观察时间较长, 对渡越现象的观测不大有效。

6. “ASTRO-ARRAY”设想^[7]

Weiler 等提出完全由空间天线组成的 VLBI 建议, 这一称之为 ASTRO-ARRAY 的 VLBI 系统, 有如下主要特点:

- (1) 由多达 30 面直径约 50m 的空间天线组成;
- (2) 波长范围为 1mm—10m;
- (3) 空间轨道的范围在 1,000—200,000 公里之间;
- (4) 相关器设在一空间站上。

目前还仅停留在设想阶段, 但看来要实现这一设想, 耗资将是十分巨大的, 仅以天线为例, 如果 10m 空间天线价一亿美元, 发射进入轨道需花一亿美元, 那末 50m 空间天线 (30 面) 的价格约为 125 亿美元, 发射进入空间三十次耗资大于 30 亿美元, 总投资至少 155 亿美元!

四、简短结语

通过 VLBI 组网观测, 射电天文学家已经积累了大量数据, 揭示了河外射电源毫角秒尺度结构及与之相关连的许多奇特现象。这些现象又反过来提出了更大量尚待观测研究的问题, 寄希望于进一步完善和发展 VLBI 观测手段, 迎接天体物理的挑战。

当然, VLBI 的发展, 从一开始就和 VLBI 硬件——包括 VLBI 记录终端及 VLBI 相关处理机的发展息息相关。目前广泛采用的系统, 已经是第四、五代的记录及处理系统了, 而未来的 VLBI 系统要求信息率、密度更高, 更经济的记录及处理设备, 否则进行有效的天体物理实测是不可能的。计算机技术及超大规模集成电路工艺是发展这些硬件的基础, 文献[16]对此有很好的评述, 这里限于篇幅, 不拟一一述及。

参 考 文 献

- [1] Preuss, E., in Proceedings of International Workshop on Astrophysical Jets, (1983).
- [2] Preuss, E., in Mitteilungen aus den Geodätischen Instituten der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, (1985).
- [3] Kühr, H. et al., *Astron. J.*, **86** (1981), 854.
- [4] Witzel, A., in Proceedings of the 5th Göttingen-Jerusalem Symposium, ed. by K. J. Fricke et al., (1981).
- [5] Kellermann, K. I. et al., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **19** (1981), 373.
- [6] Porcas, R. W., in Active Galactic Nuclei. p. 20, ed. by J. E. Dyson, (1985).
- [7] Pauliny-Toth, I. I. K., in Compact Radio Sources (lectures at Beijing Astronomical Observatory), (1985).
- [8] Pearson, T. J. et al., in IAU Symp. No. 110, p. 15, (1984).
- [9] Marcaid, J. M. et al., in Proceedings of IRAM-ESO-Onsala Workshop on mm/submm Astronomy, (1985).
- [10] Ananthakrishnan, S. et al., *Indian Journal of Radio and Space Physics*, **14** (1985), 17.
- [11] Kellermann, K. I., in IAU Symp. No. 110, p. 377, (1984).
- [12] NRAO (collab. with CIT), A Program for the Very Long Base-line Array Radio Telescope, (1982).
- [13] Legg, T. H., in IAU Symp. No. 110, p. 383, (1984).
- [14] Schilizzi, R. T. et al., in IAU Symp. No. 110, p. 407, (1984).
- [15] Schilizzi, R. T. et al., QUASAT PROJECT, (1985).
- [16] Ewing, M. S., in Indirect Imaging, p. 41, ed. by J. A. Roberts, (1984).

(责任编辑 林一梅)

Research of the Radio Source Morphology and VLBI

Wu Shengyin

(*Beijing Astronomical Observatory, Academia Sinica*)

Abstract

Since it was brought into being in 1967, VLBI has been developed as an unparalleled technique which has the high-resolution imaging ability up to submilli-arcsecond. Impressive contributions have been made to astrophysics by VLBI. It is widely accepted that VLBI will be the most hopeful and important observational equipment in radio astronomy in the next 10—15 years.

This paper begins with a brief historical review of radio telescopes to show how VLBI grows into one of the chief developing directions of observational radio astronomy. Then, the current situation of VLBI performances and the major results obtained for the compact radio source observations, which is a principal field of VLBI, are outlined as a background to look into the future of VLBI. Finally the potential VLBI systems in the coming decade are described briefly.

Lots of tables to summarize the present situation and to predict the future are used for the sake of simplification.