

VLBI 技术新进展

项 英 张 秀 忠

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

阐述了 VLBI 设备的现状: 在 20 世纪 70、80 年代建造起来的一些 VLBI 观测设备已较陈旧, 部分技术已经过时。随着现代技术的快速发展以及科学研究的更高目标, 发展 VLBI 新技术是一项重要任务; 给出了 VLBI 各方面新技术的进展情况; 新科学项目的实施是新技术发展的重要环节, 所以同时也介绍了 VLBI 的一些新科学计划的最新情况。

关键词 射电天文学 — 甚长基线干涉测量 (VLBI) — 综述 — 数字滤波 — 相关处理 — A/D 采样

分类号 P164

1 引 言

甚长基线干涉测量 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) 是 20 世纪 60 年代后期发展起来的射电干涉新技术^[1]。该技术通过设在基线两端的射电望远镜同时接收同一射电信号, 经相关处理, 获得 10^{-9} 的相对精度和亚毫角秒级的超高分辨率^[2,3]。它在天文学、空间大地测量和空间技术等领域都有重要的科学意义和实用价值。

2 VLBI 设备的现状和发展方向

传统 VLBI 先采用磁带记录信号, 再将磁带邮寄至数据处理中心进行相关处理。这种事后相关处理的方法会导致观测后通常需要数周乃至数月才能获得观测结果, 较难及时发现观测站的故障; 从而造成此间其它观测失败。其次, 采用磁带技术, 带宽难以进一步扩展, 且磁带机价格昂贵, 维护复杂, 兼容性差^[3]。另外, 由于数据处理速率和带宽的限制, 相关处理机现有的模式已不能满足大天线阵列、高分辨率等要求。总之, 传统 VLBI 系统的硬件设计和实现极其复杂, 不仅可靠性、兼容性差, 而且价格昂贵, 这些情况都迫切需要得到进一步解决。为此, 2002 年 11 月, 在韩国召开了 IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry)

关于 VLBI 新技术会议, 以促进新技术在 VLBI 上的应用。

科学研究的目标决定了 VLBI 的发展方向, VLBI 未来的发展方向是: (1) 实时性; (2) 更高的灵敏度; (3) 更宽的频率覆盖; (4) 更高的可靠性和自动化程度; (5) 更强大的相关处理机 (频域和时域分辨率); (6) 更强的成图能力; 等等。这些新发展方向需要新技术作为支撑, 建造功能更强大的设备。

3 VLBI 新技术

3.1 基于磁盘的 VLBI 数据记录系统

尽管在过去的几年内, 磁盘和磁带都有了很大的发展, 但仍可预测出, 大约到 2004 年磁盘的每单位容量将比相同容量的磁带更为便宜。IDE 硬盘的目前价格约为 2 \$ /GB, 单个硬盘的容量已约达到 160 GB, 到 2004~2005 年, 单个硬盘的容量有望达到 500~1000 GB。除了价格和容量的优势外, 以磁盘替代磁带还有其它的优点^[4]:

- (1) 不像磁带那样需要外加价格高昂的磁带机, 用户开销较少;
- (2) 磁盘记录系统要比磁带记录系统具有更高的可靠性;
- (3) 对磁盘的读写由标准接口进行, 技术的升级完全独立于接口;
- (4) 可以快速地随机存取数据;
- (5) 相对于磁带机, 使用磁盘没有磁头损耗问题;
- (6) 采用磁盘作为记录介质, 也为 e-VLBI

的实现提供了必要的条件。

美国 Haystack 正在研制的 Mark 5 系统是第一个基于磁盘的高速 VLBI 数据系统。它将采用 8 个可移动的 IDE 硬盘, 以 1024 Mbps 的速率进行数据记录。Mark 5 系统的目标是:

- (1) 低廉的价格;
- (2) 基于商用产品进行开发;
- (3) 模块化设计, 易于升级;
- (4) 便于操作以及低维护费用;
- (5) 符合 VLBI 标准接口规范;
- (6) 与已存在的 VLBI 系统兼容;
- (7) 可以方便、灵活地支持 e-VLBI;
- (8) 最小数据速率为 1 Gbps;
- (9) 24 小时不间断地记录数据。

Mark 5 系统原型示于图 1。

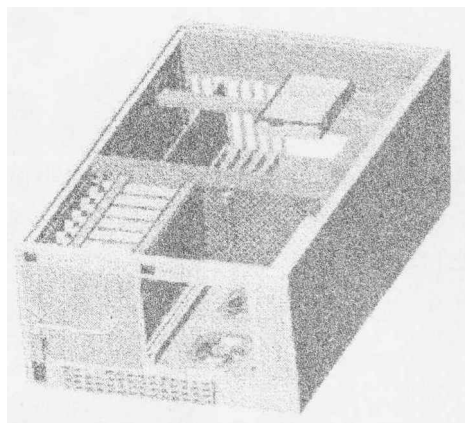


图 1 Mark 5 原型图^[4]

在 2001 年初, Haystack 已经成功地完成了速率为 512 Mbps 的 Mark 5 系统, 并进行了验证。Mark 5 系统的开发分 3 个步骤进行^[4]:

(1) Mark 5P: Mark 5P 系统可以记录来自 Mark4/VLBA 格式器上 32 个磁道的数据, 其最大数据速率: 采用 Mark 4 格式, 为 512 Mbps (16 Mbps/磁道); 采用 VLBA 格式, 为 256 Mbps (16 Mbps/磁道)。

(2) Mark 5A: Mark 5A 系统的设计是为了替代原来的磁带机。它可以记录来自 Mark4/VLBA 格式器上 8、16、32 或 64 个磁道的数据, 并且可以以 Mark4/VLBA 的格式进行数据回

放。最大数据速率: 采用 Mark 4 格式, 为 1024 Mbps; 采用 VLBA 格式, 为 512 Mbps。

(3) Mark 5B: Mark 5B 系统将具有 VLBI 标准接口, 无需外部格式器, 数据速率为 1024 Mbps, 预计于 2003 年完成。

目前, 上海天文台 VLBI 技术实验室也正在开展这方面的研究。该实验室用硬盘阵列来存储 VLBI 的观测数据, 为将来的实时 / 准实时 VLBI 作准备, 但目前更迫切的目的是为了解决磁带机的问题。原有的磁带机与相关处理机的通讯不畅, 导致经常死机; 且磁带机误码率高等问题一直使得磁带机无法正常工作。用硬盘阵列和相关设备代替磁带机的具体实现框图见图 2^[5]。其系统配置情况为: PC 机的主板采用 ADLINK NuPRO-760, 主频 1 GHz; 操作系统为 Redhat 7.2 Linux; 高速数字输入 / 输出接口板为 ADLINK PCI-7300B。该套设备目前还处于实验阶段。实验分两步进行: 先将磁带上的数据通过磁带机 (或在 VLBI 台站上直接通过 VLBI 数据格式器)、电平转化模块、高速数字输入 / 输出接口板由 PC 机经 PCI 总线记录到硬盘阵列上; 然后通过 PC 机从硬盘阵列上读出数据, 经高速数字输入 / 输出接口板、缓存、电平转化模块送入相关处理机。缓存与相关处理机之间存在着 MCB 和 RS232 接口, 对数据进行实时监控。

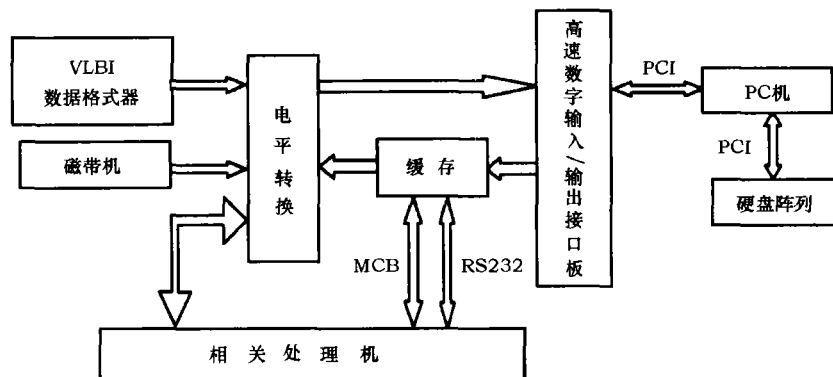


图 2 硬盘阵列回放系统^[5]

3.2 e-VLBI

随着通讯技术的发展, 实时 VLBI 或称 e-VLBI^[6] 问世, 即用数据通讯网络代替传统 VLBI 的磁带记录和磁带运输。早在 1975 年, 美国和加拿大利用美、加实验通讯卫星 Hermes 做了世界上首次实时 VLBI 实验, 并成功地获得了干涉条纹^[7]。1979 年, 日本利用 4 Mbps 带宽的微波信道进行了实时 VLBI 的演示实验^[8]。随着互联网的迅速普及, 日本的 CRL (Communications Research Laboratory) 开始进行基于 IP (Internet Protocol) 技术的 e-VLBI 实验, 其系统示意图见图 3^[9]; 同时, 欧洲 VLBI 网也正在实现 e-EVN (European VLBI Network) 计划, 目前他们通过光纤以 40 M 的速率进行数据传输, 并获得条纹^[13]。

根据通讯网络的实际情况, e-VLBI 基本上有两种方案: (1) 数据实时地从各 VLBI 台站通过通讯网络传送到相关处理机进行实时相关; (2) 数据首先在台站进行记录, 事后通过网络传送到数据处理中心的硬盘内进行事后相关。显然, 后一种方案对网络数据通讯的要求不是很高, 在目前情况下是完全可以做到的。通过实时或准实时地检测干涉条纹, 在观测前检验台

站系统的性能,可以提高观测的成功率。同时 e-VLBI 系统可以不用昂贵、笨重的磁带记录设备,降低磁带的运输管理费用和损耗风险。

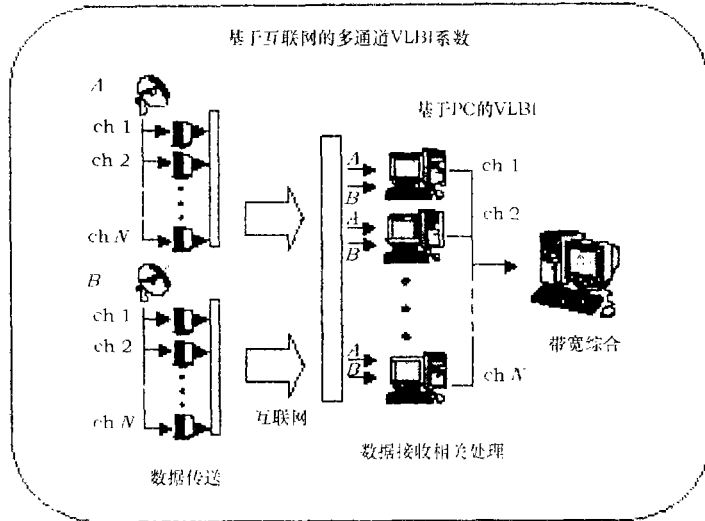


图 3 多通道 e-VLBI 系统示意图^[9]

e-VLBI 需要解决的关键技术是如何通过数据通讯网可靠、高效地传输数据,包括确定数据传输的协议、解决数据打包和重新排序,以及数据监控等问题。

3.3 数字滤波和高速 A/D (Analog-to-Digital) 采样器

3.3.1 数字滤波

在 VLBI 的数据采集终端中,用数字滤波器代替模拟滤波器始于日本在 1994 年开始的 KSP 计划 (Key-Stone-Project)^[10]。采用数字滤波可以在 ADC (Analog-to-Digital Converter) 采样后方便地选择带宽,同时提高系统的带通特性,克服模拟滤波器随环境温度的变化频率特性变化大的缺点。在 ALMA (the Atacama Large Millimeter Array, 连线的毫米波阵,它在数据采集和相关处理方面与 VLBI 有共同之处) 中,又提出了以数字 BBC (Base Band Converter) 取代模拟 BBC 的方案,数字 BBC 同时具有频段与带宽选择、条纹旋转和上、下边带选择等功能^[11]。

随着数字集成电路的发展,一个 FPGA (Field Programmable Gate Array) 芯片中就可以装下几百万个门电路,以 FPGA 芯片为平台加上合理的数字滤波算法,数字滤波实现快速、实时地处理数据将成为可能。ALMA 的数字滤波器采用查表 (Look-Up-Table) 方式^[12],避免在 FPGA 芯片内做乘法运算,大大缩短了运算时间。

3.3.2 高速 A/D 采样器

随着数字技术的发展,A/D 采样器的采样频率可以达到 Gsps (gigasamples per second) 量级,由此可以在很高的频段上直接进行 A/D 采样,并将模拟信号转化成数字信号。在 ALMA 中,采用了 4-Gsps 2-bit 的 A/D 采样器,利用高速 A/D 采样器对信号进行直接中频采样,配合光纤通讯网络,大大减少了 VLBI 系统的设备量,即将采样得到的宽带数字信号通过光纤传

送至 VLBI 数据处理中心, 数据处理中心可以根据需要任意选择所需频段进行相关处理^[13]。

3.3.3 采用高速 A/D 采样器和数字滤波的系统实现

采用高速 A/D 采样和数字滤波的系统实现, 总的来说可以有两种方案: (1) 带通数字滤波器 + 抽取数字滤波器; (2) 本振 + 低通数字滤波器。前者采用带通滤波器选择频段和带宽, 抽取滤波器降低采样速率; 而后者则采用本振来选择所需频段, 低通滤波器选择合适的带宽。上述两种方案在系统中的实现见图 4、图 5。

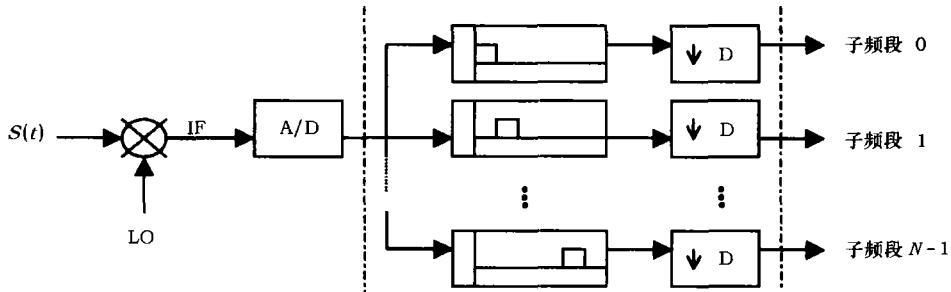


图 4 带通数字滤波器 + 抽取数字滤波器的系统实现^[19]

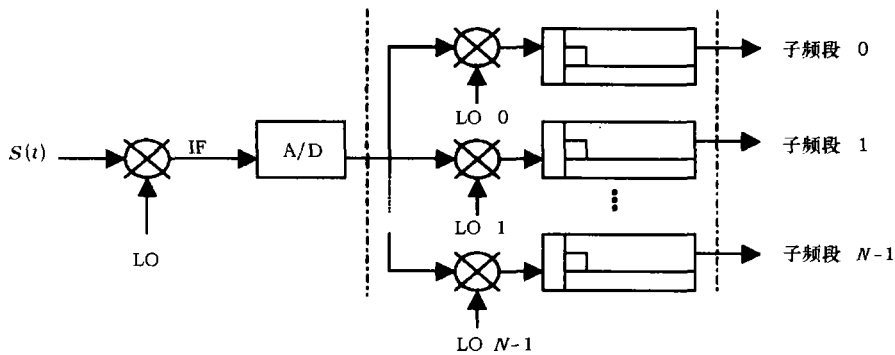


图 5 本振 + 低通数字滤波器的系统实现^[19]

3.4 最新相关处理机技术

3.4.1 混合 XF 型或 FX 型相关处理机^[14,15]

混合 XF 型或 FX 型相关处理机, 即是在原有 XF 型或 FX 型的基础上在前端加上 FIR (Finite Impulse Response) 数字滤波器组, 用于选择带宽和频分复用。图 6 是 ALMA 将设计的相关处理机的框图, 它是混合 XF 型相关处理机。

混合型相关处理机是为了适应庞大的天线阵列而设计的, 它需要解决的技术难点有: (1) 要求有足够的精度进行 FFT (Fast Fourier Transformation) 和 FIR; (2) 有待解决 FFT/FIR 与相关处理模块之间高速数据流的传输问题; (3) 需要庞大的积分电路来实现相关处理后大量数据的压缩; (4) 需要解决整个系统的功耗问题。

3.4.2 多相 FX 型相关处理机^[16]

多相 FX 型相关处理机是在原来的 FX 型基础上, 在前端加上多相数字滤波器组 (见图

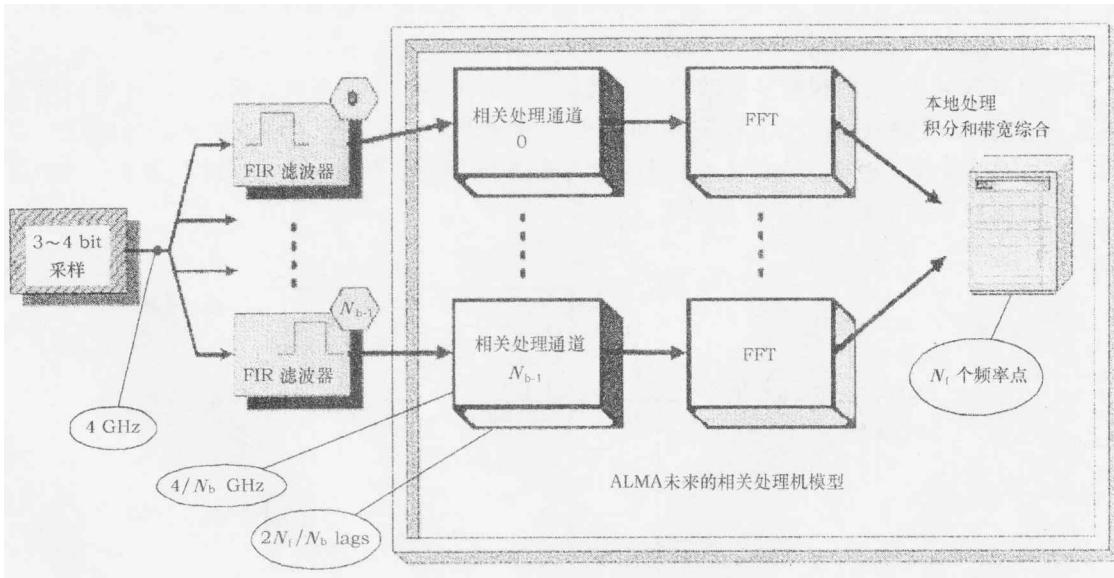


图 6 混合型 XF 相关处理机模块示意图 [15]

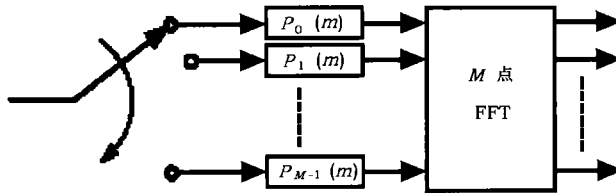


图 7 多相数字滤波器组 [16]

7)。多相数字滤波器组的设计目的在于，解决原有的 FX 型相关处理机数据处理上存在的缺陷，即与传统的 XF 型相关处理机相比，传统的 FX 型相关处理机在进行 FFT 后会增加数据量 (为了克服截断造成的泄漏效应，频谱分析时加窗函数和允许各数据段部分数据重叠会增加数据量) 和降低信噪比。现在在 FFT 之前加上多相数字滤波，则在进行频谱分析时不再需要加窗函数和各数据段部分数据重叠，而多相数字滤波器组的计算量较小，没有增加整个数据量，克服了原有的 FX 型相关处理机的缺点。

3.4.3 软件相关处理机 [17]

随着计算机性能的不提高和价格的大幅度下降，软件相关处理机的方案又被重提。EVN 提出了准实时软件相关处理机，即通过互联网将 VLBI 的观测数据传送到软件相关处理机进行准实时相关，然后再将相关结果通过互联网发送至用户。在软件相关处理机中，EVN 准备采用 FTP (File Transmission Protocol) 协议进行数据通讯。另外，JPL (Jet Propulsion Laboratory)、RadioAstron 等也都在进行软件相关处理机的研制。

3.5 VLBI 标准接口 (VLBI Standard Interface, VSI) [18]

不同的 VLBI 数据记录系统之间的相互不兼容性，已成为发挥 VLBI 观测全部潜能的巨

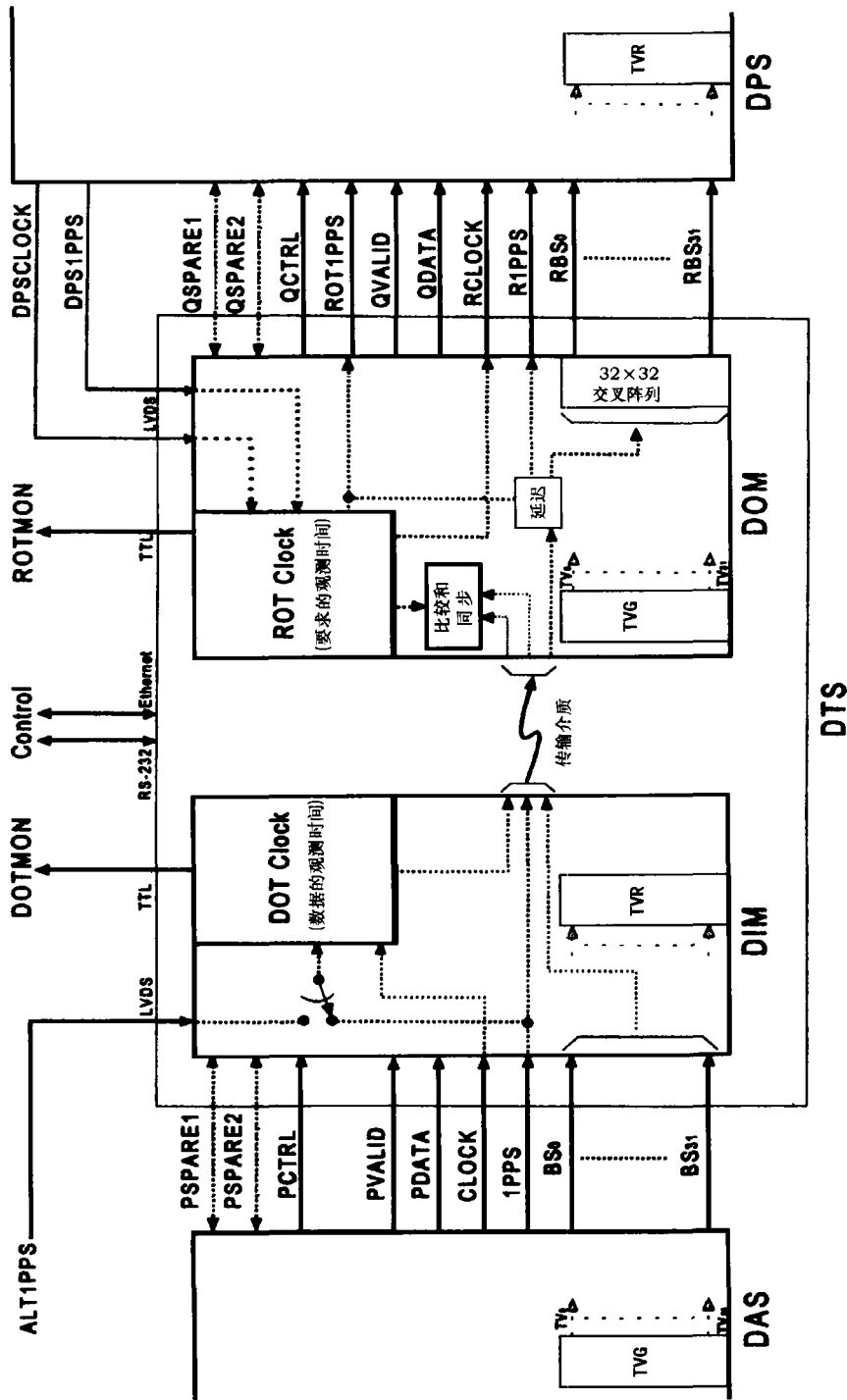


图8 VSI-H功能模块框图^[18]

大障碍。因此, 需要建立一个标准的接口规范, 即 VLBI 标准接口 (VSI), 它能使记录在不同的 VLBI 数据系统上的数据都能由统一的相关处理机进行处理。VSI 分为硬件接口标准 (VSI-H) 和软件接口标准 (VSI-S)。VSI-H 定义了接口的电器特性和时序逻辑。目前, VSI 还没有考虑即插即用, 但已考虑将软件所占的比重降到最低。

VSI 包括数据传输系统 (Data Transmission System, DTS) 和相应的接口信号, 它一端与数据采集系统 (Data Acquisition System, DAS) 相联接, 另一端与数据处理系统 (Data Processing System, DPS) 相连。数据传输系统由数据输入模块 (Data Input Module, DIM) 和数据输出模块 (Data Output Module, DOM) 构成。DIM 模块在时钟和 1 PPS 作用下, 负责接收来自数据采集系统的并行比特流, 并打入时间标签 (“观测时间”) 送至传输介质 (磁带、磁盘、光纤等)。而 DOM 模块负责接收来自传输介质的数据, 根据 “观测时间” 信息, 重新恢复数据流, 并在时序上保持与外部时钟和 1 PPS 一致。VSI-H 的功能模块见图 8。

4 VLBI 新计划^[14]

4.1 VERA 计划

VERA (VLBI xploration of Radio Astrometry) 计划是由日本国家天文台和 Kagoshima 及其它几个日本大学联合建立的项目。它是第一个主要用于相位参考 VLBI 的天线阵列。该计划由 4 个能在 2、8、22、43 GHz 波段进行观测的 20 m 射电望远镜组成。这些望远镜分别分布在日本的 Mizusawa、Iriki、Ogasawara 和 Ishigakijima, 最长的基线为 2300 km。为了消除由大气和接收机本振引起的相位起伏, VERA 能同时进行双波束观测。

4.2 VSOP-2 计划

VSOP (VLBI Space Observatory Program) 是日本的空间 VLBI 计划。由于它的成功, 第二代空间 VLBI 计划 (VSOP-2) 也正在酝酿之中。VSOP-2 的科学目标包括: 与 X 射线、 γ 射线卫星一起研究天体的辐射机制; 研究磁场的方向和喷流的演变; 以最高分辨率研究线脉泽和巨脉泽。VSOP 和 VSOP-2 的比较示于表 1。

表 1 VSOP 和 VSOP-2 的比较^[14]

	VSOP	VSOP-2
天线直径	8 m	≈10 m
天线设计	对称、卡塞格伦式	偏置式、抛物面
远地点高度	21500 km	≈30000 km
周期	6.3 h	≈8.9 h
极化	左旋圆偏振	左旋圆偏振和右旋圆偏振
下行 bit 率	128 Mbps	1~2 Gbps
观测带宽	1.6、5、22GHz	5/8、22、43 GHz
最大分辨率	0.3 mas	0.025 mas
灵敏度	140 mJy	12 mJy
发射时间	1997 年 2 月	定于 2009 年

4.3 日本月球探测器 SELENE

日本计划在未来的 30 年内,在月球上建造基地。该计划分 3 部分实施,日本的月球探测器 SELENE (SELenological and Engineering Explorer) 是其中的第一部分,它将于 2005 年发射升空。其主要的科学目标为: (1) 研究月球表面的矿物质及其元素组成; (2) 研究月球表面和次表面的结构; (3) 研究月球正面和背面的磁场; (4) 研究月球残余磁场; (5) 研究月球周围的带电粒子; (6) 从月球轨道上研究地球的磁气圈。VLBI 可以提供对 SELENE 的三维空间定位。

4.4 韩国 VLBI 网

韩国的新 VLBI 计划开始于 2001 年,计划在 7 年内完成。韩国计划建造 3 个高精度的 20 m 射电望远镜,并将在这些射电望远镜上安装 2/8、22、43 和 86 GHz 的 HEMT (High Electron Mobility Transistor) 接收机,用于进行天文、测地和地球科学的研究。该计划将采用 MK 5 记录设备,也研制新型的相关处理机。

参 考 文 献

- 1 Thompson A R, Moran J M, Swenson G W eds. *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*, New York: John Wiley & Sons, 1986: 29~33
- 2 Ulvestad J, Goss M. *Sky Telesc.*, 1999, 98(4): 36
- 3 郑为民. 博士后研究报告, 上海: 中国科学院上海天文台, 2001: 1~2
- 4 Whitney A R. In: Vandenberg N R, Baver K D eds. *2002 General Meeting Proceedings, International VLBI Service for Geodesy and Astrometry*, Japan: Tsukuba, 2002: 132
- 5 Zhang X Z, Zheng W M, Shu F C et al. *CVN Correlator and its Future*, New Technologies in VLBI, IVS Symposium in Korea, 2002, 未发表
- 6 郑为民. 博士后研究报告, 上海: 中国科学院上海天文台, 2001: 48~50
- 7 Yen J L. *Science*, 1977, 198: 289
- 8 Yoshino T. *J. Commun. Res. Lab.*, 1999, 36(1): 3
- 9 Kondo T, Koyama Y, Nakajima J et al. *Internet VLBI System Developed at CRL*, <http://www2.crl.go.jp/radioastro/tdc/siryou/2002evlbi/kondo.pdf>, 2002
- 10 Whitney A R. In: Korea Astronomy Observatory eds. *New Technologies in VLBI (Abstract)*, Gyeongju: KAO, 2002: 7
- 11 Comoretto G. *ALMA Memo #305, A Digital BBC for the ALMA Interferometer*, 2000
- 12 Escoffier R P, Webber J C, D'Addario R L et al. *Proc. SPIE*, 2000, 4015: 106
- 13 Ritakari J. *Next Generation VLBI Station (Third draft), Cost-Effective Next Generation Correlator*, <http://kurp-www.hut.fi/vlbi/instr/NextGenDAR.html>, 2001
- 14 会议资料. In: Korea Astronomy Observatory eds. *New Technologies in VLBI (Abstract)*, Gyeongju: KAO, 2002
- 15 Webber J, Escoffier R. *ALMA Correlator, ALMA Project Book, Chapter 10*, <http://www.alma.nrao.edu/development/correlator/chap10.pdf>, 2001
- 16 Bunton J. *Summary of Correlator Advances*, http://www.lofar.org/ska2002/pdfs/Bunton_CorrelatorAdv2.pdf, 2002: 3~4
- 17 McKay D J. *A Proposal for a Software Correlator for the European VLBI Network*, http://www-ra.phys.utas.edu.au/~rdodson/Imags/rtc_prop.ps.gz, 1997
- 18 *VLBI Standard Hardware Interface Specification—VSI-H*, http://web.haystack.edu/vsi/2000_08_07_vsi-h_final_rev_1.pdf, 2000

19 项英, 张秀忠. 数字滤波技术应用于 VLBI 数据采集的方法研究, 2003, 未发表

Recent Progress of New Technology in Very Long Baseline Interferometry

Xiang Ying Zhang Xiuzhong

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

Abstract

The current status of traditional VLBI (Very Long Baseline Interferometry) equipments is reviewed and the VLBI wish is proposed in this paper. The recent researches of technologies in VLBI are also presented. Still, some introductions on new VLBI projects are given.

Key words radio astronomy—VLBI (Very Long Baseline Interferometry)—review—digital filtering—correlation—A/D sampling

* * * * *

《天文学进展》2004 年征订启事

《天文学进展》2004 年征订事宜委托天津市全国非邮发报刊联订服务部全权办理。刊物为季刊, 每年的 3、6、9、12 月下旬出版, 每期定价 25 元, 全年 100 元 (含邮寄费和包装费)。凡需订阅者请将订刊款通过邮局或银行直接按以下地址汇出即可:

邮政编码: 300381

地 址: 天津市大寺泉集北里别墅 17 号

户头全称: 天津市河西区联合征订服务部

帐 号: 605248-1046196

开户银行: 工商银行天津市尖山分理处

电 话: (022) 23973378; (022) 23962479

传 真: (022) 23973378

网 址: www.lhzd.com

E-mail: lhzd@public.tpt.tj.cn

汇款时请注明“订阅 2004 年《天文学进展》(编号 5155)”字样和订阅份数、订户名称、收件人姓名、地址、邮政编码。联合征订部收到订刊款后即会奉上发票。本编辑部在刊物出版时即及时奉寄。凡在 2004 年中订阅者均能及时收到本刊。凡非通过上述渠道订阅本刊者, 如有延误或寄失, 本编辑部概不负责, 敬请谅解。

欢迎订阅, 谢谢支持!

《天文学进展》编辑部

2003 年 9 月 1 日