

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2015.04.06

VLBI 软件相关处理机现状和发展趋势

陈 中^{1,2,3}, 郑为民^{1,2}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 射电天文重点实验室, 上海 200030; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 相关处理机是 VLBI 数据处理系统的核心设备。基于计算机集群和高性能并行计算技术研发的软件相关处理机, 正逐渐成为 VLBI 海量观测数据处理的主流, 并以其灵活性、扩展性、易用性等特点, 在天文、测地和深空探测领域中获得广泛应用。梳理了国内外主流 VLBI 软件相关处理机系统发展历史和技术架构, 并做归纳比较, 最后分析未来的应用需求及发展趋势。

关键词: 甚长基线干涉测量; 软件相关处理机; 高性能计算

中图分类号: P228.6 **文献标识码:** A

1 引 言

甚长基线干涉测量 (Very Long Baseline Interferometry, 简称 VLBI), 是 20 世纪 60 年代末随着原子钟和数字化采集记录技术的出现而发展起来的高精度射电天文观测技术。由于 VLBI 具有极高的角分辨率和测量精度, 已广泛应用于天体物理学、大地测量学和深空探测等科学研究和工程实践中。

随着科学研究的不断深入, 对 VLBI 观测灵敏度和观测精度的要求越来越高, 导致观测带宽和观测数据速率大幅提高, 要求数据处理的能力也不断提升。VLBI 观测数据的相关处理具有数据密集和计算密集的双重特点。相关处理机系统是 VLBI 数据处理的核心, 从实现方式上可分为硬件相关处理机和软件相关处理机两种类型。

最早的相关处理机为基于通用计算机的软件处理机。当时通用计算机性能无法满足宽带 VLBI 数据处理需求, 从 Mark3 系统之后, 国际上各主要 VLBI 中心均采用基于专用集成电路 (Application-Specific Integrated Circuit, 简称 ASIC) 或现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, 简称 FPGA) 芯片开发的专用硬件相关处理机。随着近 10 年通

收稿日期: 2015-04-28; 修回日期: 2015-06-01

资助项目: 国家自然科学基金 (11103067, 11173052, 11373061); 上海市优秀学术带头人项目 (14XD1404300); 上海市导航定位重点实验室项目 (06DZ22101); 中国科学院青年创新促进会资助项目

通讯作者: 郑为民, zhwm@shao.ac.cn

用处理器和高速通信技术的发展,以通用计算机集群为平台并基于高性能并行计算技术的软件相关处理机得到快速发展。软件相关处理机通过高速通信网络集合多台多处理器计算机,成为一套逻辑上统一的并行高性能计算系统,协同利用多个处理器并行计算以实现高速处理。由于软件处理机具备易修改、易移植和易扩展的特性,相对于传统的硬件相关处理机,可大大缩短开发、测试和移植周期,快速增加新功能,快速修改缺陷。软件处理机软件的灵活性也很适合实时 e-VLBI 系统集成应用。纵观国内外情况,软件处理机已经逐步替代硬件处理机,成为 VLBI 相关处理的主流设备。

2 相关处理机功能和类型

相关处理机的主要功能是计算 VLBI 天线数据的复可见度函数或者互功率谱。根据处理过程中执行傅里叶变换 (F) 与交叉相乘 (X) 积分的顺序,相关处理机有 FX、XF 两种类型。FX 型处理机将时延补偿、条纹旋转和相位补偿等复杂计算过程在基于台站模式上进行计算,采用快速傅里叶变换 (FFT) 提高计算速度。而 XF 型处理机的计算是基于基线模式的,在台站数较多时,计算复杂度要大大高于 FX 型。过去的硬件处理机采用硬件实现对低量化比特数据的时域相关, XF 方式因计算实现简单,被广泛采用。FX 型在浮点计算精度上要优于 XF 型处理机^[1]。目前国际上绝大部分软件相关处理机都基于 FX 型研发。图 1 比较 XF 型和 FX 型相关处理计算复杂度的差异,其中 n_s 代表台站数, n_t 为每段计算数据采样点长度。

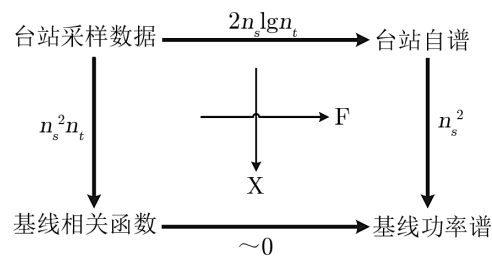


图 1 FX 和 XF 型处理机理论计算量比较^[1]

FX 型相关处理机按照计算流水线功能划分,可分为以下几个模块: (1) 数据接收解码; (2) 整数比特延迟补偿; (3) 条纹旋转; (4) 快速傅里叶变换计算; (5) 小数比特延迟补偿; (6) 交叉相乘平均累加。根据应用领域不同,实现方式也有差别。

根据时延补偿方式不同,相关处理机又可分为基于基线补偿和基于台站补偿两类,两者的区别在于选取计算时延模型的参考点不同。基于基线的处理机选择基线中某个台站作为参考点,基于台站的处理机则选择地心作为参考点^[2]。

3 软件相关处理机的历史和现状

20 世纪 60 年代, 美国国立天文台 (National Radio Astronomy Observatory, 简称 NRAO) 在 IBM360/50 主机上开发了最早的软件相关处理机, 并被美国航空航天局戈达德太空飞行中心 (NASA/GSFC) 采用, 当时处理能力仅为 $26.7 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[3,4]。受限于早期通用计算机性能, VLBI 社区转而开发基于 ASCII 和 FPGA 芯片的专用硬件相关处理机。其中的代表为荷兰 VLBI 联合研究所 (Joint Institute for VLBI in Europe, 简称 JIVE) 和美国麻省理工大学 Haystack 天文台 Mark4 硬件相关处理机, 美国国立射电天文台 (NRAO) 的 VLBA 硬件相关处理机^[5,6], 加拿大国家研究委员会 (National Research Council of Canada, 简称 NRC) 和澳大利亚国家望远镜中心 (Australian Telescope National Facility, 简称 ATNF) 的 S2 硬件相关处理机^[7], 日本空间 VLBI 项目 VSOP (VLBI Space Observatory Program) 硬件相关处理机^[8]。

虽然硬件相关处理机一度成为主流, 但国际上一直努力尝试在通用计算机平台上开发软件相关处理技术, 特别是近十几年多核通用处理器性能得到飞跃发展, 越来越多的软件相关处理机版本相继出现。目前主要有澳大利亚 Swinburne 大学研发的 DiFX 及后续版本、JIVE 研发的 SFXC 处理机、日本国立情报通信研究所 (National Institute of Information and Communications Technology, 简称 NICT) 研发的 K5 系列、俄罗斯应用天文研究所 (Institute of Applied Astronomy, 简称 IAA) 研发的 VGOS (VLBI Global Observation System) 处理机、美国航空航天局喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, 简称 JPL) 研发的 JVC 处理机和中国上海天文台研发的中国 VLBI 网 (Chinese VLBI Network, 简称 CVN) 处理机。这些软件处理机各自应用于天文、测地和深空探测等多学科及工程领域, 后面将逐一详细介绍。

3.1 DiFX 软件相关处理机

DiFX (Distributed FX) 是目前使用最广泛的软件相关处理机。DiFX 处理机概念最早受 Swinburne 大学脉冲星观测数据记录和处理的 CSRP2 系统启发^[9]。2005 年由 Deller 博士在 Swinburne 大学开发的 DiFX 软件相关处理机, 逐步替换了 ATNF S2 硬件相关处理机^[10]。

3.1.1 DiFX 软件相关处理机架构

如名字所示, DiFX 为 FX 型架构, 采用 C++ 语言和 Intel IPP (Integrated Performance Primitives)^[11] 及 OpenMPI (Open Message Passing Interface)^[12] 库开发, 运行于 Linux 操作系统。其相关计算主要可分为基于台站和基于基线两类^[10]。

1. 基于台站的操作

(1) 按时间对齐数据流。通过 CALC9^[13] 软件计算的延迟模型对每个台站的数据进行基于地心的整数比特延迟补偿, 使得各台站数据的数据流对齐, 且误差在 ± 1 个采样时间间隔之内。通过此步操作, 数据转换为由现代通用处理器更善于处理的浮点数表示, 相对于硬件处理机可大大提高计算精度。

(2) 条纹旋转。条纹旋转通过对每个台站的数据进行复数乘法, 以此来补偿接收信号由于

经过基带转换引入的相对于地心的相位差。根据条纹旋转在 FFT 运算前后可分为“Pre-F”和“Post-F”两种方式，并可由用户控制采取哪种方式。

(3) FFT 和小数比特改正。经过整数时延补偿的数据和条纹旋转的数据转换为频域数据，用户可自行采用快速傅里叶变化或者滤波器来实现变换。最后一步小数比特改正，转换到频域后一个 FFT 周期内小数比特误差可近似为常数，改正起来比 XF 型容易，用户可选择用 FFT 或者数字多项滤波器算法来实现。

2. 基于基线的操作

(1) 交叉相乘。将每条基线上每个频段和每个极化方向的数据按照对应通道进行交叉相乘。

(2) 积分输出。在每个积分周期内对上述数据结果进行累加，并对有效数据进行标记获取权重信息。每个积分周期对应于相应的 FFT 点数，为获取更高的谱线观测灵敏度，也可以对 FFT 窗口进行混叠，由此带来的计算量也相应增加。

(3) 矫正天线温度。通过后处理软件对天线温度进行计算并补偿到相关处理过程，以此来获得以 J_{ν} 表示的功率谱。

3. 输出可见度数据：以 RPFTIS 文件表示

除以上两种操作外，DiFX 还具备脉冲星分箱技术 (pulsar binning) 功能。DiFX 采用非相干消色散方法，并实现任意相位间隔上的脉冲门分箱技术。对高斯脉冲，相对于硬件处理机的单开关脉冲门技术，采用 Binning 技术可提高约 6% 的信噪比，最佳情况下可提高 21%^[10]。

DiFX 软件相关处理机运行基于 x86 架构 CPU 的计算机集群上。处理程序由一个主节点 (FxManager) 来控制数据流节点 (DataStream) 和计算节点 (Cores)，数据流节点负责传递分段数据到计算节点，计算节点进行处理后的结果汇集到主节点进行存储。原始数据来自于磁盘上或者网络数据流。这种架构的优点在于既能进行基于磁盘的相关处理，又能进行实时 e-VLBI (electronic VLBI) 相关处理机，展现了软件的灵活性。DiFX 还具备人机图形交互界面 (Graphical User Interface, GUI)，简化操作，方便使用。处理机基本结构如图 2 所示。

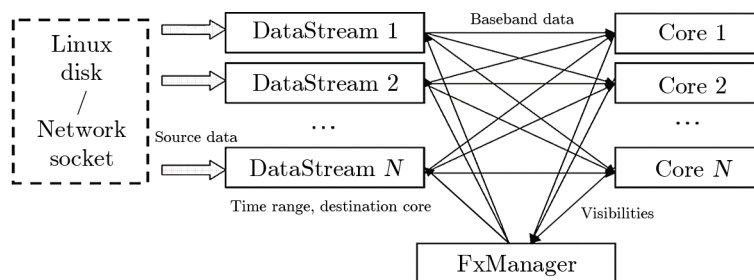


图 2 DiFX 软件处理机结构图^[10]

由于 DiFX 采用通用处理器和通信网络技术，为提高性能和效率，采用双缓冲和无阻塞通信技术。影响处理机性能主要包括通信网络和 CPU 负载两个方面，需要根据实际的处理

需求进行灵活的配置调整以达到最佳处理性能。DiFX 软件大多部署在最新的 CPU 集群上, 利用更低延迟更高带宽的 Infiniband 网络互联, 获取更佳的整体处理性能。

3.1.2 DiFX2 软件处理机新特性

由于 DiFX 处理机的灵活性和开源特性, 被 ATNF、NRAO、Haystack 天文台、德国马普射电天文研究所 (Max Planck Institute for Radio Astronomy, 简称 MPIfR)、美国海军天文台 (United States Naval Observatory, 简称 USNO) 等组织采用, 替换上一代硬件处理机。这些研究机构联合组成国际开发小组, 于 2009 年发布经过大量改进的 DiFX 2.0 新版本^[14], 目前最新稳定版为 2.4.0。在 DiFX2 中新增的特性包括: (1) FITS-IDI 和 Mark4 数据格式输出; (2) 本地 Mark5^[15] 数据通信接口; (3) 相位校正信号提取; (4) 谱选择和谱平均; (5) 多相位中心; (6) 相关处理精确模型的存储; (7) 新的数据监视工具, 包括自相关滤波器开关、基于台站的谱峭度估计、实时可见度数据监视^[14]。

DiFX2 新增的功能还包括: 台站晶振漂移补偿、支持 e-VLBI UDP 协议、支持以 VDIF^[16] 数据格式封装的复采样数据、任意钟差补偿。DiFX2 同样在性能方面也获得提升, 包括更高效率的向量化相位选择的改进, 减少基于台站交叉相乘数据在 CPU 高速缓存缺失的改进。

最后, 为简化操作, 对相关处理机的配置、运行监视和日志也进行修改和增强^[14]。

目前, DiFX 软件相关处理机已经在多个研究机构的多套计算机集群上进行部署, 有的已经用于天体物理、测地等科学观测数据处理^[17]。其中, MPIfR 研发 dra 版本 DiFX 软件, 专用于处理俄罗斯领导的空 VLBI 项目 RadioAstron 的观测数据, 此版本目前暂未开源^[18]。NRAO 与 NASA 合作开发特殊的 DiFX 深空探测器处理功能模块, 但不对中国开放。

3.2 SFXC 软件相关处理机

荷兰 JIVE 研究所在参加卡西尼-惠更斯土星探测计划时, 开发了一套软件相关处理机用于处理跟踪惠更斯卫星降落土卫六过程^[19]。这套软件相关处理机经过一系列改进, 发展为欧洲 VLBI 网 (European VLBI Network, 简称 EVN) 软件相关处理机 SFXC (Super FX Correlator), 并应用于天体物理观测。

SFXC 软件相关处理机架构也属于 FX 型的集群式处理, 采用 C++ 和 MPI 进行开发, 运行于 Linux 操作系统和 x86 CPU 平台。它具备基于广域网通信网络进行分布式网格处理的独特特性。SFXC 由 VEX (VLBI EXperiment) 和 CCF (Correlator Control File) 两类控制文件驱动。相关处理的模型计算采用 CALC10^[13] 软件生成。SFXC 处理机包括输入节点 (input nodes)、相关处理节点 (correlator nodes)、输出节点 (output node) 和管理节点 (manager node)。管理节点负责协调相关处理进程和数据分配, 输入节点读取来自磁盘或网络上的天线数据并进行解码和整数比特延迟补偿, 输出到相关处理节点, 每个相关处理节点处理对节点分配的一段所有台站数据进行相关处理, 输出节点获取相关处理后的数据并输出, 通过辅助软件, 结果数据可转换为 FITS-IDI 格式。处理机结构和算法如图 3 所示。

SFXC 处理机支持 FTP 条纹检测、e-VLBI 实时处理、VDIF 数据格式、本地 Mark5 通信接口等功能。SFXC 还具备脉冲星 gating 和 binning 技术、多相位中心、空间飞行器跟踪、

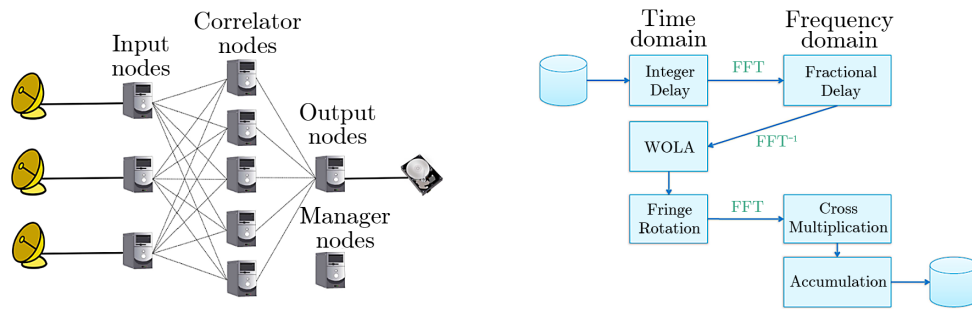


图 3 SFXC 软件处理机结构和算法图^[20]

相位阵、大视场成图、超高谱分辨率等处理模式^[21,22]。自 2012 年, JIVE 停用上一代 MarkIV 硬件处理机, 取而代之以 SFXC 软件相关处理机承担日常的硬盘记录和实时 e-VLBI 的数据处理。与 DiFX 相比, SFXC 不仅能对观测数据按照时间片分段并行计算, 还能按照子通道并行计算。在处理流程上, SFXC 特殊之处在于条纹旋转前就进行小数比特改正。目前, JIVE 已在常规观测中使用 SFXC 进行 FTP 条纹检测、深空探测器多普勒跟踪、RadioAstron 脉冲星数据处理、行星际无线电科学研究等^[20]。

3.3 K5 软件相关处理机

日本 NICT 较早开展并持续进行 VLBI 相关处理机研究, 对基于通用处理器的软件处理机的结构算法进行了较为深入的研究, 开发多个处理机版本并获得成功应用。

20 世纪 80 年代, 日本开发了 XF 型的 CCC (Cross Correlation in a Computer) 软件相关处理机, 用于条纹测试, 在 HP1000/A900 计算机上相关处理能力仅为 $1.8 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[23]。1999 年左右, NICT 在 CCC 的基础上开发了 K5 软件相关处理机, 并增加了相位提取和带宽综合功能, 当时测试达到的最高性能为 $10 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上^[24]。为了满足天体物理高频谱分辨率要求, NICT 继续开发了 K5-FX 型软件相关处理机, 通过利用多处理器、SIMD 指令集和汇编语言优化, 实现了最大 $90 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ 处理速度^[25]。

受 SETI@home^[26] 项目启发, NICT 开发了一套命名为 VLBI@home 分布式相关处理软件^[25,27]。其具备 XF、FX、测地模式、天物模式多种相关模式选择, 但现已停止开发。

在积累丰富的经验后, NICT 又相继开发了两种软件相关处理机: 支持多通道的 K5/VSSP 处理机和宽带 GIGO3 处理机, 采用 C 语言开发, 运行于 Linux 操作系统, 分别服务于测地和科研实验两种需求^[28-30]。其中 K5/VSSP 处理机包括 FX (“fx_corr”) 型和 XF (“corr”) 型两种, 前者主要用于搜索钟差, 后者主要用于 1 bit 量化的测地数据处理。不同于其他集群处理机采用 MPI 来调度计算任务, K5 软件处理机采用 Perl 脚本把计算任务分配到各个 PC 机上, 进行分布式计算来进行相关处理。处理机架构如图 4 所示。

为满足 VGOS 海量数据处理需求, NICT 计划新研制基于计算机集群和 MPI 的软件相关处理机方案 Kashima Flexible Correlator (KFC), 未来将拓展使用 GPU 等众核协处理器^[31]。

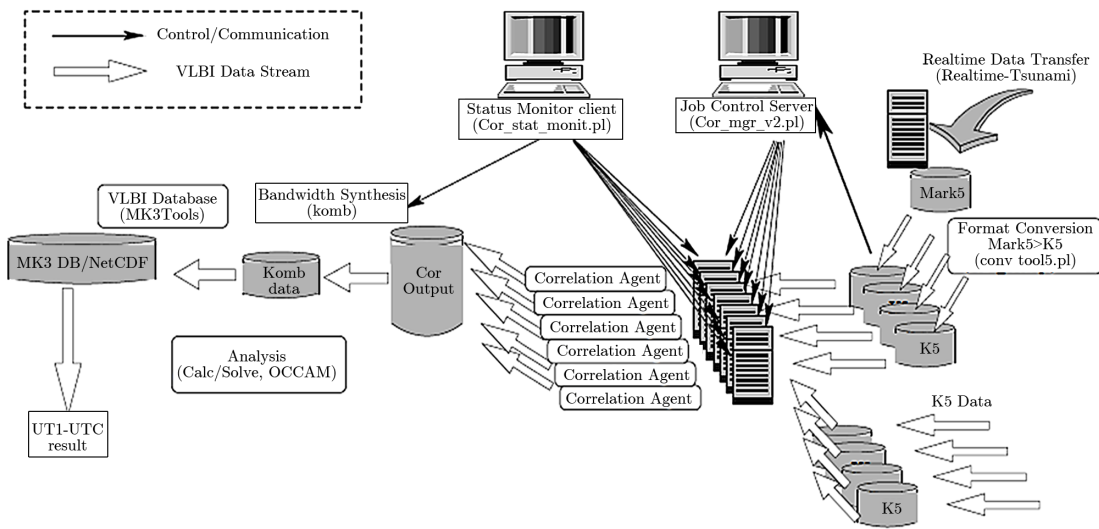


图 4 K5 分布式软件处理机架构图^[28]

3.4 IAA 软件相关处理机

俄罗斯科学院应用天文研究所 (IAA RAS) 为实现 VGOS 数据相关处理, 采用类似 DiFX 处理机的架构, 正开发基于 GPU 集群的 FX 型软件相关处理机。开发环境为 C 语言、MPI 和 CUDA^[32]。完成后将替换原有的六台站硬件相关处理机。处理机内部模块包括头节点 (head module)、台站节点 (SM-station module) 和相关处理节点 (CM-correlation software modules)。头节点负责管理调度, SM 节点负责提取相位矫正信号、数据同步、整数延迟补偿和比特重排, CM 节点负责相关处理。其中 SM 和 CM 节点主要的计算量都是在 GPU 上完成的^[32]。其中, 由于 VGOS 系统采样频率较高, 小数比特延迟带来的误差极小, IAA 处理机中省略了小数比特延迟补偿功能。处理机的结构和处理流程如图 5 所示。

目前 IAA 已经完成相关处理机的开发, 正在进行验证和比对。硬件平台为 32 个 Nvidia K20c GPU 相关处理节点, 8 个台站节点, 40 Gb Infiniband 网络互连, 处理能力为 6 台站每台站 16 Gb·s⁻¹ 数据率下进行准实时处理。目前正在开发后处理软件及控制软件, 完成之后将为测地 VGOS 系统服务^[33]。

3.5 JVC 软件相关处理机

1996 年, NASA/JPL 开发了一套处理机软件 SoftC 用于硬件处理机性能评估和分析历史数据。在火星奥德赛卫星入轨项目中 SoftC 得到第一次成功应用, 随后又在其他美欧日等深空探测器导航定轨中获得大量应用^[34,35]。

SoftC 处理机用 C 语言和 MPI 通信协议开发, 可运行在 Linux 和 Solaris 系统, 硬件平台为 16 节点的计算机集群, 可从 Mark5 系统或者磁盘阵列读取数据。吸取硬件处理机缺陷——难以调试和修复, 在开发 JVC (JPL VLBI Correlator) 核心处理引擎 SoftC 软件过程中, 特别强调代码调试, 其中 40% 的时间耗费于开发蒙特卡洛数据产生器, 用于产生用户

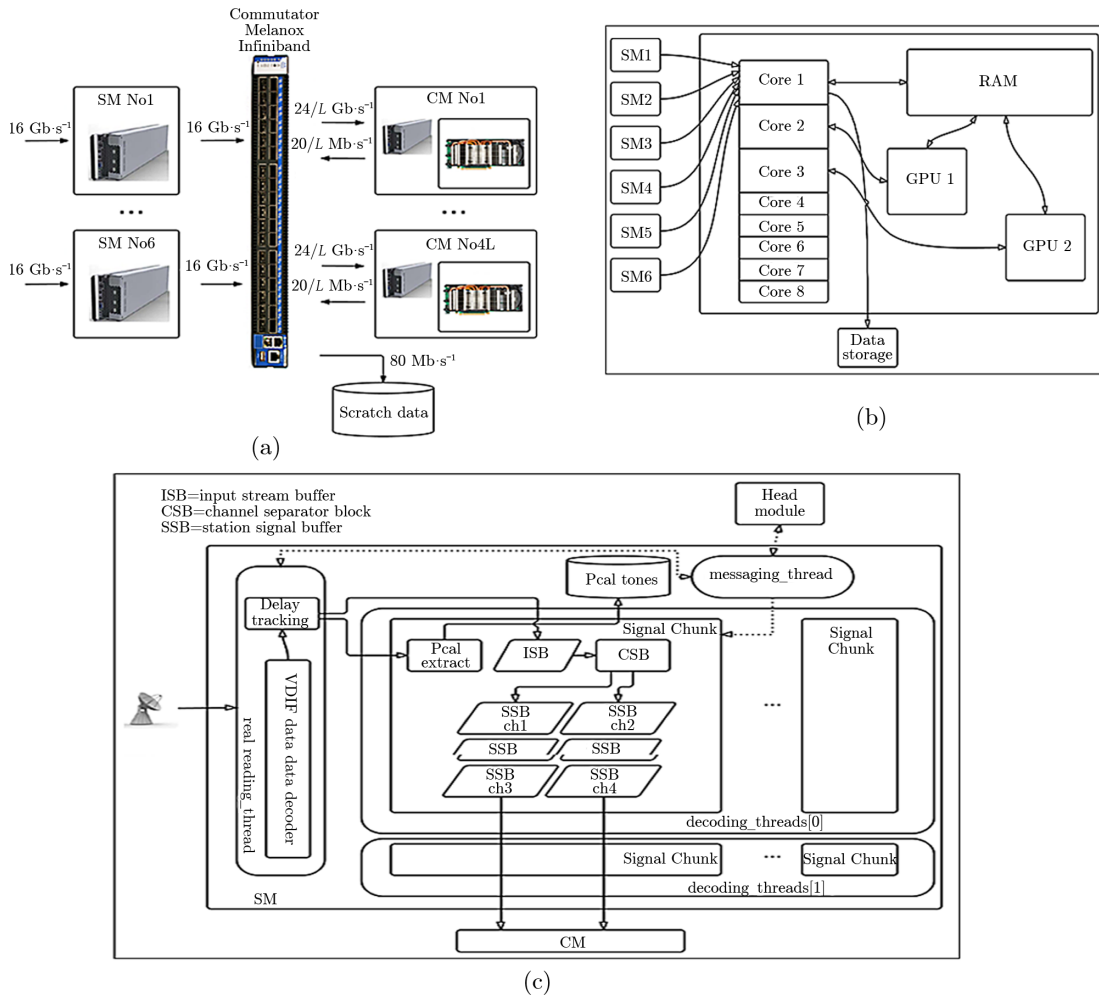


图 5 (a) IAA 软件相关处理机结构图; (b) CM 处理流程示例图; (c) SM 单元处理流程示例图^[33]

自定义模型或者相关处理模型来对软件处理机进行测试^[36]。JVC 处理机主要应用于为深空探测器导航提供测定轨服务，同时还应用于两个项目：参考源目录维护和增强的任务 (CAT M&E)，时间和地球运动精度观测任务 (TEMPO)。由于 SoftC 的巨大成功和显著的性能优势，JPL 取消了新一代硬件处理机的开发计划^[35]。JPL 实验室通过对 SoftC 继续研发和扩展，演变为 JVC 软件相关处理机。处理机结构和数据流程如图 6 所示。

3.6 CVN 软件相关处理机

CVN 软件相关处理机由上海天文台研制开发。受探月工程项目支持，该处理机主要服务于探月工程 VLBI 测轨分系统，承担月球探测器 VLBI 精密测定轨任务，同时具备处理测地数据的功能，已成功为大陆地壳运动监测网络分系统提供 VLBI 数据处理服务^[37]。

CVN 软件相关处理机也是基于计算机集群的 FX 型处理机，其前身是基于多核 PC 服

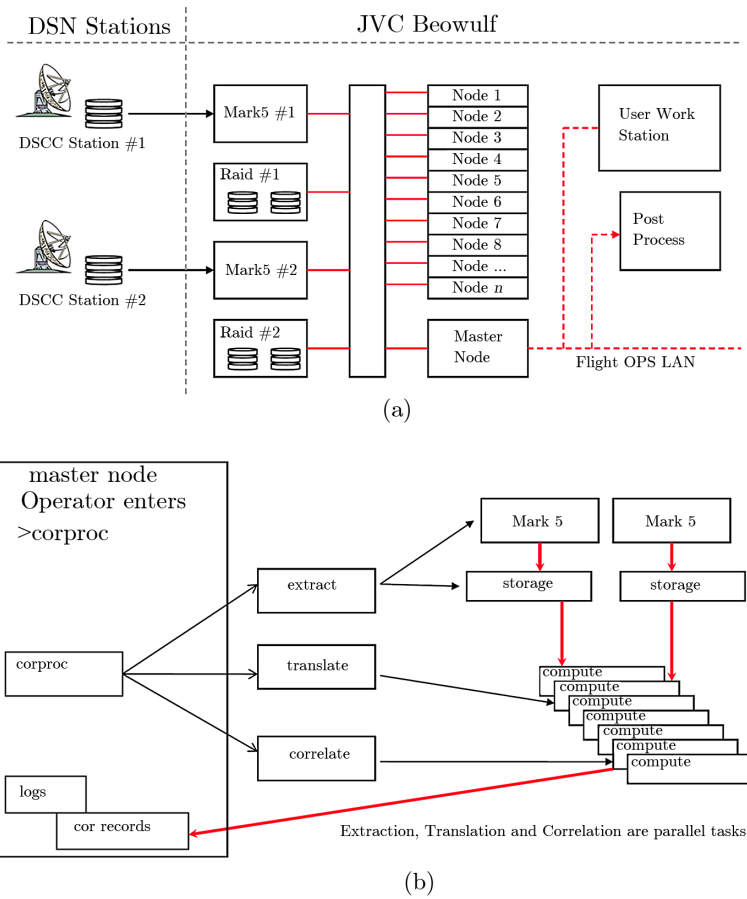


图 6 (a) 为 JVC 软件处理机结构图; (b) 为数据处理流程图^[35]

务器平台单机版多线程相关处理机^[37]。集群版处理机运行于 Linux 操作系统, 开发语言为 C, 采用 OpenMP 和 MPI 两级并行优化结构, 并使用 Intel IPP 函数库进行向量化优化以提升计算速度^[39,40]。

CVN 软件相关处理机的运行平台为 16 节点的刀片服务器 (共 192 个计算核心), 5 个数据 IO 节点 (共计 60 TB 存储空间), 2 个管理节点。节点之间数据通信采用 10 Gb 以太网, 节点之间的 MPI 通信采用 40 Gb Infiniband 网络, 处理性能达到 4 台站每台站 1.4 Gb·s⁻¹ 处理速度^[36]。处理机结构如图 7 所示。

CVN 软件处理机的特性包括^[36] 以下 5 个方面。

- (1) 实时卫星快速条纹搜索。通过探测器测控载波信号数据计算精确的延迟和延迟率并重构相关处理计算模型。
- (2) 相位信号提取。提取所有通道的相位信号, 可用于计算台站设备仪器延迟。
- (3) 实时可视化监视。QuickView GUI 软件显示信号特征和自相关及互相关谱结果。

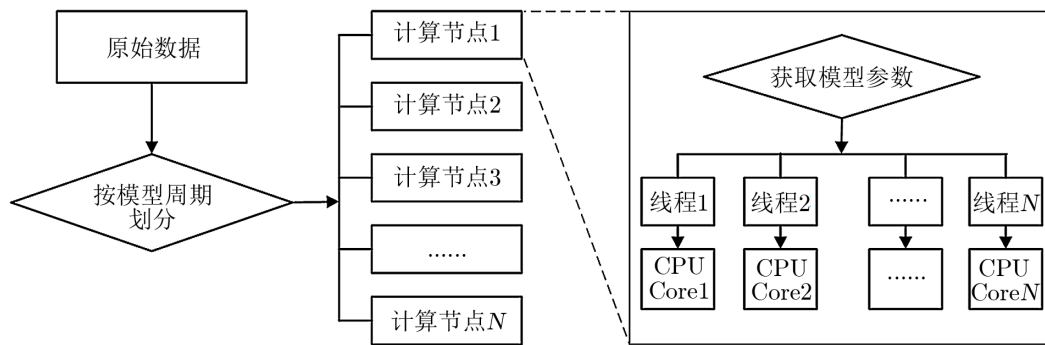


图7 CVN软件处理机并行处理结构图^[35]

图右边为计算节点算法分解示例图。

(4) 数据输出格式。支持探月工程专用 CVN 数据格式，也支持标准的 FITS-IDI、MK4、NGS 数据格式用于天文成图、测地。

(5) 应用。探月工程，测地观测，天文成图。

2012 年上海天文台成为 IVS 相关处理中心之一，2014 年在上海佘山 VLBI 数据处理中心部署了一套具备 420 个 CPU 核和 432 TB 存储容量的 DiFX 相关处理集群，用于 IVS 测地数据处理，以及连续谱和脉冲星等天体物理观测数据的处理^[41]。目前已完成测试验证，正式为 IVS 提供相关处理服务

3.7 其他软件相关处理机

除了上述 VLBI 软件处理机外，与空间卫星相关的还有俄罗斯列别捷夫物理研究所天文空间中心 (Astro Space Center of Lebedev Physical Institute, 简称 ASC) 的软件相关处理机。ASC 处理机采用 FX 架构，运行于 Windows 系统。ASC 具备连续谱、谱线和脉冲星观测数据处理功能，具备 GUI 操作界面，其中脉冲星处理包括相干消色散和脉冲门技术。ASC 软件相关处理机已经用于 RadioAstron 项目的数据处理^[42,43]。

中国北京航天控制中心也开发了一套软件处理机，用于国内深空网天线联合 CVN 以及国外 VLBI 网联合观测数据处理。目前第三版软件升级为类似于 DiFX 架构的计算机集群版，并已成功处理金星快车和嫦娥三号卫星 VLBI 观测数据^[44]。

3.8 主要性能参数比较

软件处理机具备结构灵活的特点，理论上对处理的台站总数、带宽、频谱分辨率、通道数等没有限制，通过扩展硬件规模，即可提升处理性能。若硬件平台升级到新一代 CPU 集群和网络设备，软件不经过修改即能直接运行。

主流软件处理机的主要技术参数指标对比结果如表 1 所示。

从对比可以看出，各研究机构的领域不同，软件处理机的应用也各有异同，FX 架构处理机占了大多数。除 K5 处理机使用独特的松耦合分布式架构，其余都是采用紧耦合的 MPI 集群架构。各处理机均实现对主流 VLBI 观测数据格式的支持，输出数据格式支持通用的 FITS-IDI 格式，部分处理机是依靠数据转换软件来实现转换到 FITS-IDI 格式。DiFX 和

表 1 主流软件处理机参数比较

	DiFX	SFXC	K5	JVC	IAA	CVN
类型	FX	FX	FX+FX	FX	FX	FX
架构	CPU 集群	CPU 集群	分布式 CPU 集群	CPU 集群	GPU 集群	CPU 集群
处理模式	实时模式、 事后模式	实时模式、 事后模式	实时模式、 事后模式	实时模式、 事后模式	实时模式、 事后模式	实时模式、 事后模式
高性能 函数库	Intel IPP	Intel IPP	SIMD 汇编、 定制化 FFTW	无公开 资料	CUDA	Intel IPP
输入 数据 格式	VLBA、 Mark5A、 Mark5B、LBA、 VDIF、RDF*	VLBA、 VDIF、 Mark5A、 Mark5B	K5、VDIF、 Mark5A、 Mark5B	Mark5A、 Mark5B、 VDIF	Mark5B、 VDIF	Mark5A、 Mark5B、 VDIF、 RDEF**
输出 数据 格式	FITS-IDI、 Mark4	FITS-IDI、 PSR-FITS	FITS-ID、 Mark3DB	FITS-IDI	FITS-IDI	CVN 自定义 FITS-IDI
PCAL	有	有	有	有	有	有
多相位 中心	有	有	无	无	无	无
脉冲星 处理	Pulsar Gating Binning	Pulsar Gating Binning	无	无	无	开发中
条纹 搜索	有	有	有	有	有	有
图形 监控	有	有	有	有	开发中	有
应用	天体物理、 测地、 空间 VLBI、 深空探测	天体物理、 空间 VLBI、 深空探测	测地、 深空探测	深空探测、 测地	测地	深空探测、 测地、 天体物理

注: RDF* 即 RadioAstron Data Format, 为俄罗斯空间 VLBI 项目采用的自定义 VLBI 观测数据格式。

RDEF** 是空间数据系统咨询委员会 (CCSDS) 双差分单向测距 (Δ DOR) 原始数据交换格式 (Δ DOR-RDEF)。

SFXC 软件处理机比其他处理机功能更丰富, 具备多相位中心和脉冲星处理功能, 能够支持更多类型科学观测。CVN 处理机也在扩展类似功能。为了简化操作, 各处理机大多实现了图形化的监视或者操作界面。

4 软件相关处理机的应用

在射电天文应用研究方面, 欧洲 VLBI 网主要采用 SFXC 软件相关处理机, 美国的 VLBA 网和澳大利亚 VLBI 网采用 DiFX 软件相关处理机。韩国的 KVN 观测网和日本的

VERA 观测网仍然采用硬件相关处理机。与硬件相关处理机相比, SFXC 和 DiFX 软件相关处理机的优点是支持脉冲分箱技术, 支持多相位中心数据处理, 也具有超高谱分辨率的相关处理功能, 在脉冲星相位参考观测、大视场成图和谱线 VLBI 观测等方面具有强大的优势。输出数据采用 FITS 格式, 可供 AIPS^[45] 软件或 Difmap^[46] 软件进行综合成图。也可通过进一步的数据处理, 开展 VLBI 校准源搜寻、射电源视差和自行等参数的测量。

在空间测地应用方面, 美国 Haystack 天文台、美国海军天文台和德国马普射电天文研究所都采用 DiFX 软件相关处理机和配套的 HOPS 相关后处理软件。上海天文台 2013 年引进和掌握了这些软件的操作方法, 从 2015 年初开始承担国际测地 VLBI 网的数据相关处理任务, 并通过 DBedit 数据库编辑软件生成国际通用的 MK3 Database 格式的时延观测量文件, 提交给 IVS 数据中心, 供后续的数据分析软件, 例如 Calc/Solve 使用。JPL 开发了独立的观测量计算软件 Fit^[36] 和数据分析软件 MODEST^[47]。NICT 的鹿岛宇宙中心通过对美国 VLBI 技术的引进和创新, 建立了独立的 K 系列测地 VLBI 相关处理系统, 可以输出国际通用的 MK3 Database 时延观测量文件。20 世纪 90 年代美国国立射电天文台建成长基线干涉阵列 VLBA, 与哥达德空间飞行中心 (GSFC) 合作, 通过改进 AIPS 软件实现了输出 MK3 Database 观测量文件的功能, 但 AIPS 软件针对微弱信号的观测量计算方法存在一定缺陷, 并没有得到广泛应用。俄罗斯 IAA 相关处理机目前可以输出 NGS^[48] 格式的时延观测量文件, 能够配套使用的数据分析软件只有 OCCAM^[49] 和 VieVS^[50], 因而具有一定的局限性。

在深空探测方面, 美国航天局 JPL 的 JVC 软件处理机服务于美国深空网, 并成功应用于美国火星奥德赛、火星探险漫游者、勇气号、机遇号、欧洲猎兔号火星探测器和日本 Nozomi、Muses-C 等多个深空探测项目。欧洲 JIVE 研制的 SFXC 处理机, 最早应用于卡西尼-惠更斯项目, 对惠更斯卫星进入土卫六时的跟踪数据进行了成功处理, 利用该探测器信号获得高精度的延迟噪声为 20 ps。在欧洲 SMART-1 月球探测卫星跟踪观测中, SFXC 进一步服务于验证 VLBI 对环月轨道目标的跟踪能力, 并处理相应的观测数据。日本在近些年开展的深空探测项目过程中, 也一直应用 VLBI 和软件相关处理机来进行探测器的跟踪, 包括希望号 (Nozomi) 火星探测器、小行星探测器游鹰 (Hayabusa) 和探月卫星 SELENE。

在中国探月工程一期和二期中, VLBI 网作为测轨分系统参加了对月球探测器的测定轨工作, 上海天文台自研的软件相关处理机扮演了关键的数据处理角色, 已作为 VLBI 中心主要处理机, 实际应用于嫦娥一号、嫦娥二号、嫦娥三号 and 嫦娥五号再入返回试验共 4 次任务。特别是在探月工程二期的嫦娥三号任务中, 实时性和可靠性要求最高, 软件相关处理机通过对实时性处理和快速条纹搜索技术的攻关, 实现基于集群环境的 1 min 的高性能实时处理, 在整个数据处理系统中发挥了关键作用。在探月工程三期和火星探测等其他自主的深空探测项目中, VLBI 网和软件相关处理机将继续发挥核心的数据处理作用。

5 未来需求和发展趋势

5.1 未来需求

根据 IVS VGOS 测地系统观测计划^[51], 从 2015 年开始少量 VLBI 台站 VGOS 试观测项目, 到 2020 年 24 台站常规观测和相关处理。观测的爆发数据率为 $32 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$, 以观测占空比 2:1 计, 平均数据速率为 $16 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$, 到 2020 年每天 VGOS 联合观测相关处理的总数据量将达到 1 PB 以上, 所需计算机 CPU 核数将达 3900 核。而目前 IVS 相关处理中心拥有最多核数的为 USNO, 也仅仅为 512 核。计划扩容后拥有最多核数的 MPIfR 波恩相关处理中心为 1500 核, 但与 VGOS 的未来需求相差甚远^[52]。

VGOS 数据量和相关处理需求统计如表 2 所示。

表 2 VGOS 相关处理计划能力估算^[52]

年份	台站数	每天观测 时间/h	单站每天 总数据量/TB	每天处理 总数据量/TB	处理机 CPU 核数
2015	8	4	7.2	58	200
2016	10	8	14.4	144	600
2017	16	8	14.4	230	900
2018	20	10	18	360	1400
2019	24	12	21.6	518	2000
2020	24	24	43.2	1037	3900

根据 EVN 2015 天体物理科学远景目标, 面向四大类科学研究目标希望取得突破, 相关的技术设备也需要大幅升级和扩展。其中相关处理最高能力需求为每台站 8 bit 采样和 $256 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ 数据率, 总台站数为 32 个, 由此总数据流量将达到 $1 \text{ TB}\cdot\text{s}^{-1}$, 其相关处理计算量比 VGOS 系统高两个数量级^[53]。

天体物理对宽视场、多相位中心和高频谱分辨率的处理需求, 也对软件相关处理机计算能力和高性能算法提出更高的要求^[54]。

在深空探测领域, 软件相关处理机将继续服务于飞行器的测量跟踪和测定轨, 如 DiFX、SFXC 和 ASC 软件处理机共同为 RadioAstron 空间 VLBI 项目服务。在国内, CVN 软件处理机将继承探月工程一期和二期 VLBI 测定轨系统成功经验, 继续为探月工程三期服务。不同于前两次任务, 软件相关处理机将增加动态双目标观测处理能力, 对两个目标飞行器 VLBI 观测数据实现实时处理, 从而为中国首次月面采样返回工程任务中的 VLBI 测轨分系统提供实时数据处理保障^[55]。

5.2 发展趋势

就像脉冲星处理、多相位处理功能等一样, 相关处理机的发展必须满足 VLBI 科学研究提出的新要求。未来无论是 VGOS 还是 EVN2015, 对相关处理机提出的挑战都是巨大的, 现有的技术和设备要么无法满足海量数据处理要求, 要么实现起来代价不菲。为此, 研究 CPU 集群平台上采用新的高性能众核处理器, 如 GPU 或者 MIC (Intel Many Integrated

Core Architecture), 建立混合架构高性能集群, 就成为解决海量 VLBI 数据相关处理的可行技术路径之一^[56-58]。国内上海天文台也正在开展 GPU 软件相关处理技术研究。国外也有研究人员尝试 GPU+FPGA 的混合架构来处理海量数据, 但是由于 FPGA 开发调试固有的难度和长周期, 以及计算机总线带宽的限制, 不如用前述方案简单易行^[59]。

在软件编程架构上, 除了采用传统的 MPI 并行计算编程方式, 还可借鉴目前流行的大数据云计算 Map-Reduce 编程方式, 降低 MPI 并行编程的学习和开发复杂度。研究表明, 虽然目前此种方式在性能上没有明显优势, 但其实现和扩展简单, 具有一定的发展潜力^[60]。

此外, 由于相关处理同时具有计算密集和数据密集的特点, 无论是台站到相关处理中心广域网宽带大数据通信, 还是软件相关处理机内部低延迟消息通信, 需要分别利用更新的 40 Gb/100 Gb 以太网技术和 56 Gb/100 Gb Infiniband 网络技术来解决。

从超级计算机 TOP500 排行榜看, 基于混合架构计算机集群的高性能计算系统, 其性能提升将继续保持线性增长趋势^[61]。据此, 软件相关处理性能也极有可能保持同样的线性增长, 但这种增长是建立在软件相关处理技术针对应用特点进行更精细的优化设计上才能获得。另一方面, 从 GreenTOP500 排行榜看, 前三位都是基于众核处理器混合架构的高性能集群, 说明混合架构的超级计算机是目前性能功耗比最理想的架构^[62]。

随着应用 VLBI 技术的深空探测项目越来越多, 对实时 e-VLBI 模式软件处理机的要求也越来越高, 比如 CVN 软件相关处理机将参与到探月三期工程, 需要在下降、软着陆和上升返回等阶段对双目标飞行器进行实时测定轨和定位。在 VGOS 和 EVN2015 计划中, 均提出实时 e-VLBI 相关处理的需求。未来 VLBI 观测将越来越频繁, e-VLBI 模式和 e-Transfer 模式以及硬盘记录模式还将并存一段时间, 因此软件相关处理机需要具备实时处理、经磁盘缓存的准实时处理和事后处理三种模式。实时相关对软件处理不仅提出功能和性能的要求, 更重要的是对大规模集群计算提出可靠性要求; 在功能上具备实时网络通信接口和应对网络传输波动冗余能力, 在性能上具备不低于总数据流速率的处理能力; 在可靠性上具备发生计算节点故障时自动转移与恢复计算能力。

目前不少软件相关处理机还需要在事先和事后进行输入输出数据格式转换额外工作。以 VDIF 为例, 国际 VLBI 团体逐渐建立统一的观测数据格式, 以及统一的应用数据存储格式, 因此软件相关处理机输入输出数据格式也逐步走向标准化, 有助于减少相关处理的复杂性工作量, 有助于减少后续数据分析和整理以及发布使用, 更有助于实现连续的自动化观测和自动化数据处理。

未来软件相关处理机发展的关键技术, 可总结为: 海量数据高性能和高可靠计算、宽带实时 e-VLBI 处理和标准化数据格式。

6 总 结

经过近 10 年的发展, 软件相关处理机已经是 VLBI 数据处理的主流系统。针对天体物理和大地测量以及深空探测各领域的科学需求, 一方面, 软件相关处理机面临呈指数级增加

的海量数据处理的巨大技术挑战; 另一方面, 软件处理机的功耗也是不得不考虑的现实问题, 需要采用更为绿色环保的解决方案。为了解决计算和功耗的双重挑战, 软件相关处理机需要依靠新的芯片技术, 在系统架构和软件算法等方面进行持续创新和发展, 才能满足将来的科学研究和工程应用需求。

参考文献:

- [1] 郑为民. 博士后研究报告, 上海: 中国科学院上海天文台, 2001
- [2] Romney J D. Synthesis Imaging in Radio Astronomy II. Taylor G B T, Carilli C L, Perley R A, eds. Scorro: NRAO, 1999: 57
- [3] Bare C, Clark B G, et al. Science, 1967, 157: 189
- [4] Moran J M, et al. Science, 1967, 157: 676
- [5] Schilizzi R T, Aldrich W, Anderson B, et al. THE EVN-MarkIV VLBI DATA PROCESSOR. Experimental Astronomy, 2001, 12: 49
- [6] Whitney A R, Cappallo R, Aldrich W, et al. Radio Science, 2004, 39(1): 241
- [7] Carlson B R, et al. PASP, 1999, 111: 1025
- [8] Horiuchi S, et al. Adv.Space Res., 2000, 26: 625
- [9] Bailes M. ASP Conf.Ser., 2003, 302: 57
- [10] Deller A T, Tingay S J, Bailes M, et al. PASP, 2011, 123: 275
- [11] <https://software.intel.com/en-us/intel-ipp>, 2015
- [12] <http://www.open-mpi.org>, 2015
- [13] <http://gemini.gsfc.nasa.gov/solve>, 2015
- [14] Deller A T, Brisken W F, Phillips C J, et al. PASP, 2011, 123(901): 275
- [15] <http://www.haystack.edu/tech/vlbi/mark5>, 2015
- [16] <http://vlbi.org/vdif>, 2015
- [17] <http://cira.ivec.org/dokuwiki/doku.php/difx/users>, 2015
- [18] Bruni G, Anderson J M, Alef W, et al. <http://pos.sissa.it/archive/conferences/230/119/EVN%202014.119.pdf>, 2015
- [19] Pogrebenko S V, Gurvits L I, Campbell R M, et al. Planetary Probe Atmospheric Entry and Descent Trajectory Analysis and Science, Wilson A, ed. Netherlands: ESA, 2004, 544: 197
- [20] Kettenis M, Keimpema A. <http://pos.sissa.it/archive/conferences/230/088/EVN%202014.088.pdf>, 2015
- [21] Keimpema K A, Duev D A, Pogrebenko S V, et al. Radio Science and Space. Noordwijk:ESA/ESTEC, 2011: 41
- [22] Kruithof N. Grid Enabled Remote Instrumentation, Davoli F, Meyer N, Pugliese R, Zappatore S, eds. Santa Margherita Ligure: Springer, 2009: 537
- [23] Kondo T, Amagai J, Kiuchi H, et al. J. Commun. Res. Lab., 1991, 38(3): 503
- [24] Kondo T, Koyama Y, Sekido M, et al. Technical Development Center News CRL, No.17. Tokyo: Communications Research Laboratory, 2000: 22
- [25] Kimura M, Nakajima J. Technical Development Center News CRL, No.22. Tokyo: Communications Research Laboratory, 2002: 31
- [26] <http://setiathome.ssl.berkeley.edu>, 2015
- [27] Takeuchi H, Kondo T, Koyama Y, et al. IVS 2004 General Meeting Proceedings. Vandenberg N R, Baver K D, eds. Washington: NASA, 2004: 200
- [28] Kondo T, Koyama Y, Kimura M, et al. IVS 2004 General Meeting Proceedings. Vandenberg N R, Baver K D, eds. Washington: NASA, 2004: 186

- [29] Sekido M, Takefuji K, IVS 2012 General Meeting Proceedings. Baver K D, Behrend D, and Armstrong K L, eds. Washington: NASA, 2012: 204
- [30] Sekido M, Takefuji K, Tsutsumi M. IVS 2013 General Meeting Proceedings. Baver K D, Behrend D, Armstrong K L, eds. Washington: NASA, 2013: 221
- [31] Takefuji K, Ujihara H. IVS 2012 General Meeting Proceedings. Baver K D, Behrend D, and Armstrong K L, eds. Washington: NASA, 2012: 204
- [32] <https://developer.nvidia.com/cuda-zone>, 2015
- [33] Ken V, Mishin V, et al. IVS 2014 General Meeting Proceedings. Behrend D, Baver K D, Armstrong K L, eds. Beijing: Science Press, 2014: 195
- [34] Lowe S T. IVS 2004 General Meeting Proceedings, Vandenberg N R, Baver K D, eds. Washington: NASA, 2004: 191
- [35] Steve R, Chuck G, Eric C, et al. <http://naca.larc.nasa.gov/search.jsp?R=20150008291&q=N%3D4294925544>, 2015
- [36] Zheng W M, Zhang J, Yu Y, et al. IVS 2014 General Meeting Proceedings, Behrend D, Baver K D, Armstrong K L, eds. Beijing: Science Press, 2014: 188
- [37] Zheng W M, Quan Y, Shu F C, et al. IVS 2010 General Meeting Proceedings. Behrend D, Baver K D, eds. Washington: NASA, 2010: 157
- [38] 郑为民, 舒逢春, 张冬. 宇航学报. 2008, 29(1): 18
- [39] Zheng W M, Chen Z. Proceedings of the 2009 First IEEE International Conference on Information Science and Engineering, Washington: IEEE, 2009: 303
- [40] 童力. 博士后研究报告, 上海: 中国科学院上海天文台, 2014: 15
- [41] 江悟, 沈志强, 舒逢春. 天文学进展, 2014, 32(4): 516
- [42] Kostenkol V I, Andrianov A S, Avdeyev V Y, et al. http://pos.sissa.it/archive/conferences/178/098/11th%20EVN%20Symposium_098.pdf, 2015
- [43] The RadioAstron User's Handbook. <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/documents/rauh/-en/rauh.pdf>, 2015
- [44] Han S T, Tang G S, Chen L. IVS 2014 General Meeting Proceedings. Behrend D, Baver K D, Armstrong K L, eds. Beijing: Science Press, 2014: 482
- [45] <http://www.aips.nrao.edu>, 2015
- [46] Shepherd M C. ASP Conf.Ser. 1997, 125: 77
- [47] Sovers O J, Jacobs, et al. IVS 2004 General Meeting Proceedings. Vandenberg N R, Baver K D, eds. Washington: NASA, 2004: 272
- [48] Ma C. NGS Card Format. <http://lupus.gsfc.nasa.gov/global/ngs-doc.html>, 2015
- [49] Titov O, Tesmer V, Boehm J. IVS 2004 General Meeting Proceedings. Vandenberg N R, Baver K D, eds. Washington: NASA, 2004: 267
- [50] <http://views.geo.tuwien.ac.at>, 2015
- [51] Petrachenko B, Behrend D, Hase H, et al. VGOS Observing Plan. http://ivscc.gsfc.nasa.gov/technology/vgosdocs/vgos_observing_plan_140213.pdf, 2015
- [52] Petrachenko B, Bertarini A, Alef W. VGOS Data Transmission and Correlation Plan. http://ivscc.gsfc.nasa.gov/technology/vgosdocs/VGOS_DataTransmissionCorrelation_Plan_141118.pdf, 2015
- [53] <http://www.evlbi.org/publications/EVN2015FinalV2.pdf>, 2015
- [54] van Langevelde H J. http://pos.sissa.it/archive/conferences/163/048/RTS2012_048.pdf, 2015
- [55] 欧阳自远. 地球科学进展, 2004, 19(3): 51
- [56] Wayth R B, Greenhill L J, Briggs FH. PASP, 2009, 121: 857
- [57] Clark M A, La Plante P C, Greenhill L J. International Journal of High Performance Computing Applications, 2011, 27(2): 178
- [58] Malady R, Dodson R, Kitaef V. Proceedings of the 2012 workshop on High-Performance Computing for Astronomy Date, New York: ACM, 2012: 5

- [59] Woods A. Dissertation, Cape Town: Univ of Cape Town, 2010: 84
[60] 田斌, 何强, 王佳. 西安交通大学学报, 2015, 49(4): 61
[61] <http://www.top500.org>, 2015
[62] <http://www.green500.org/news/green500-list-november-2014>, 2014

Current Status and Development of VLBI Software Correlator

CHEN Zhong^{1,2,3}, ZHENG Wei-min^{1,2}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Correlator is the core component of VLBI data processing device. Software correlator, which is based on the development of high performance computing clusters and parallel algorithms, is becoming the main stream of VLBI massive data processing. Moreover, due to its flexibility, short R&D cycle, easy usage as well as its convenience for upgrading and expanding, software correlator has been widely used radio astronomy, geodesy and deep space exploration. In this paper, we summarize the history and evolution of software correlators developed by different institutes in the world and compare their architectures and analyze its trend of future demands and development.

Key words: VLBI; software correlator; high performance computing