

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2014.04.01

利用 DiFX 处理 CVN 天文 观测数据进展

江 悟^{1,2,3}, 沈志强^{1,2}, 舒逢春^{1,2}, 郭 丽¹,
闫 振^{1,2}, 陈 中^{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 观测数据处理的核心单元, 相关处理机的输出结果可以直接作为天文成图、测地学以及航天器干涉测量等应用的输入。DiFX 是运行在分布式计算、共享存储单元的集群环境下最成功的软件相关处理机之一。首先介绍上海天文台 DiFX 综合平台的现状; 然后介绍利用 DiFX 相关处理机处理中国 VLBI 网 (CVN) 天文观测数据的进展; 最后简短展望了 DiFX 平台为 CVN 及国际 VLBI 天文观测提供相关处理服务的前景。可为利用该平台的相关处理结果开展科学研究提供参考。

关 键 词: 射电天文; VLBI; DiFX; 脉冲星; 测地学

中图分类号: P228.6 **文献标识码:** A

1 引 言

VLBI 是现代天文学观测中角分辨率最高的观测技术之一, 在天体物理学、测地学和深空探测器测定轨等领域具有广泛的应用。VLBI 技术通过地理位置相隔遥远的天线阵单元同时接收和记录来自同一射电发射源 (如连续谱辐射源、脉泽、脉冲星或深空探测器等) 的无线电信号, 再将其送往相关处理机系统进行处理后, 作进一步的分析研究以获得有价值的科学结果^[1]。相关处理机将 VLBI 观测过程中各分立射电望远镜采集的射电源信号实现相关处理, 并将相关处理结果按指定格式输出, 相关处理的效果将直接影响观测结果。因此, 相关处理系统是整个 VLBI 系统中不可或缺的核心单元^[2, 3]。

收稿日期: 2014-03-12; 修回日期: 2014-05-13

资助项目: 上海天文台重点项目 (287151002); 国家自然科学基金 (11003039, 11173046)

通讯作者: 江悟, jiangwu@shao.ac.cn

2 概 述

2.1 DiFX 相关处理机介绍

近年来, 随着计算机性价比不断提高, 软件相关处理机逐步兴起。与传统硬件相关处理机相比, 其具有精度高、灵活、开发周期短等特点。DiFX (Distributed FX Correlator) 是国际流行的开源软件相关处理机, 最初由澳大利亚 Adam Deller 博士在 2006 年开发, 并不断得到其他研究机构 (如美国 VLBA、德国马普射电所、美国 Haystack 天文台等) 扩展和完善^[3-5]。继上述研究所相继采用 DiFX 作为 VLBI 数据处理平台后, 意大利 IRA 和韩国 KVN 也在利用 DiFX 进行相关处理。DiFX 硬件平台一般主要包括管理节点、计算节点、磁盘阵列、Mark5 设备和网络设备, 可以根据具体的处理需求灵活配置。目前, 美国 VLBA 的 DiFX 系统配备 24 节点 232 核计算单元、14 台 Mark5 设备、40 Gb Infiniband 网络连接, 主要处理 VLBA 10 台站的天文观测数据; 德国 MPIfR 相关处理中心 DiFX 平台配备 60 节点 480 核计算单元、14 台 Mark5 设备、505 TB 磁盘阵列、20 Gb Infiniband 网络连接, 可以同时处理 10 多个台站的 IVS 观测数据和天体物理观测数据; 韩国 KVN 的 DiFX 系统也从 16 核、200 TB 磁盘阵列更新到 36 节点 592 核计算单元、720 TB 磁盘阵列、56 Gb Infiniband 网络连接的配置, 运算能力达到 11 TFLOPS。

DiFX 的软件运行系统框图如图 1 所示, 主节点首先利用观测纲要 vex 文件、台站 log 文件、计算节点与 Mark5 设备 machine 文件和 DiFX 相关处理配置参数 v2d 文件, 生成相关处理的控制输入 input 文件; 然后控制从磁盘阵列或 Mark5 设备读取原始数据, 分配到各计算节点进行相关处理, 生成中间级的 SWIN 格式可见度数据; 最后主节点将收集到的可见度数据转换成天体物理学需要的 FITS 格式和测地学需要的 Mark4 格式结果。DiFX 通过调用 FFTW, Inter IPP 和 OpenMPI 三个基本算法库实现高速运算。其中, FFTW 是一个快速计算离散傅里叶变换的标准 C 语言程序集, 支持分布式存储 MPI 并行; Intel IPP 中主要调用的是针对 Intel cpu 开发的优化向量计算库, 通过向量计算可以明显提高运算速度; OpenMPI 是一种高性能消息传递库, 主要用作多核计算节点之间的消息传递。

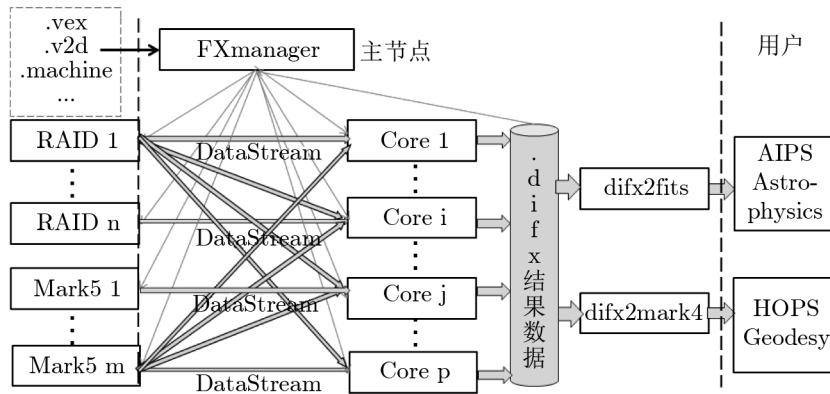


图 1 DiFX 系统运行框图

DiFX 是 FX 型相关处理机,其相关处理类似于一般的 FX 相关处理机流程。具体分为两个过程,首先基于台站进行整数时延补偿,条纹旋转,FFT 和小数时延补偿;再基于基线进行交叉相乘和积分累加,输出可见度数据。鉴于软件处理机灵活、可扩展的优点,在开发过程中增加了一些特殊处理功能:在 zoom 模式中对感兴趣的频段进行放大,提高频谱分辨率;在脉冲星处理过程中,可以根据脉冲到达多项式文件提供的参数进行非相干消色散,同时利用 binconfig 文件分割的脉冲星轮廓相位周期添加脉冲门,提高信噪比;还可以通过 UV 移位 (UV-shifting) 和在可见度函数中进行相位调整,扩展 VLBI 成图范围到干涉仪阵列中单天线的整个主瓣,提高观测的效率等^[6]。相关处理结果的输出格式支持用于天文成图的 FITS 和测地学的 Mark4 文件格式。还有一个包括 CIRA、VLBA 和 MPIFR 等国际相关处理中心成员组成的开发小组,该小组负责 DiFX 程序的改进和更多功能的实现。DiFX 的版本从 DiFX1.0 到 DiFX1.5 再到 DiFX2.0,目前已经推出 DiFX 2.3。同时,DiFX 开发小组和用户一直保持紧密联系,不断扩展 DiFX 的功能和性能。

2.2 CVN 概况

CVN 目前包括 4 个台站和 5 台天线,分布在上海、北京、昆明和乌鲁木齐,其中上海台站有两台分别是佘山 25 m 和天马 65 m 口径射电望远镜,其他台站对应的天线口径分别是 50 m, 40 m 和 25 m。CVN 基线的东西方向最长 3000 多 km,南北方向超过 2000 km。各台站均配备 S/X 波段接收机,其中上海站和乌鲁木齐站还有 L 波段、C 波段等接收机。VLBI 数字终端主要包括我国自主研发的数字基带转换器 CDAS^[7]和国际通用的数据记录与回放设备 Mark5B^[8]。各台站与位于上海的相关处理中心通过 internet 网络互连,但受限于网络传输带宽和成本,对于宽带观测高数据率实验,各台站的原始数据先记录在本地的 Mark5 硬盘上,然后将硬盘寄送到上海相关处理中心进行后续处理。参考文献 [9–13] 包含各台站天线的效率和系统温度等性能参数。这些参数在不断更新,建议在设计观测实验和数据处理时采用最新的性能参数数据或观测时台站记录的这些参数的实测值。

CVN 自组建以来,主要参与了我国探月工程的测定轨任务,同时也组织进行了脉冲星、测地学等观测实验。另外,上海、昆明和乌鲁木齐台站还参与国际 VLBI 观测,如 IVS, APSG 等。将来如果位于贵州贵阳的 500 m 口径 FAST 望远镜和新疆奇台的 110 m 望远镜建成参与 VLBI 观测,则国内的 VLBI 观测能力和探测水平将进一步提高。同时也对相关处理机的性能提出了更高的要求。

2.3 SHAO-DiFX 目前状态

上海天文台 (SHAO) 拥有自主研发的窄带硬件^[14]和软件相关处理机^[15],主要用于探月工程等深空探测任务的相关处理。在国内,利用 DiFX 处理 CVN 观测数据的研究工作也不断进行。2009 年首次对 CVN 脉冲星 PSR B0329+54 观测数据的成功处理,既验证了 DiFX 与 CVN 数据的兼容性,又为后续工作积累了丰富的经验^[16]。

目前,已经搭建了运行于 4 台集群计算机的 DiFX 相关处理平台,包括头节点和 3 个计算节点。头节点计算机包含 2 个 6 核 Intel E5-2620 2.0 GHz CPU,计算节点包括 2 个 8 核 Intel E5-2609 2.4 GHz CPU。6 台 Mark5 设备,Mark5 设备与集群服务器之间用 1 Gb/s 以

太网连接。50 TB 磁盘阵列。该平台安装了 DiFX2.2、DiFX2.3 以及条纹监测软件 HOPS3.8, HOPS3.9^[17]。在平台满负荷的情况下, 相关处理 4 台站能达到 $1024 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ /台站, 6 台站为 $580 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ /台站。在实际运行时, 一般保持 50% 左右的负荷, 确保平台的正常稳定运行。随着 DiFX 版本不断升级, DiFX 的功能不断得到扩展和完善。接下来主要介绍 DiFX 处理天体物理学和测地学数据的新进展。

3 观测数据处理

DiFX 平台处理观测数据分为 3 部分: 第一部分是读取和准备 Mark5 或 VDF^[18] 格式原始数据信息, 第二部分是准备相关处理的输入和运行相关处理, 第三部分是条纹检测和后处理。在条纹测试和后处理过程中, 如果发现相关处理中的问题或需要更改相关处理的参数, 则还需要重复第二部分和第三部分的操作。DiFX 中 Mark5 数据的输入支持多种方式: 一种是输入 Mark5 硬盘 VSN 号码和 Mark5 设备代号, 直接从 Mark5 设备读取原始数据进行相关处理; 也可以通过 jive5ab^[19] 等程序将硬盘数据拷贝到磁盘阵列, 输入存储在磁盘阵列中的文件路径信息, 读取存储在文件系统中的原始数据; 还可以同时读取 Mark5 设备和磁盘阵列的数据^[3, 4]。

准备相关处理的输入和运行相关处理, 不同的观测实验具有不同的要求。首先需要观测申请者提供观测纲要文件, 可以是 sched 软件生成的 skd 文件或 sked 生成的 vex 文件; 其次是台站提供观测时的系统状态记录 log 文件, 对于有特殊处理要求的, 需要提供相关文件, 如脉冲星观测的脉冲到达多项式, 多相位中心的子目标源位置列表等。特殊处理要求主要体现在 DiFX 参数配置 v2d 文件中, 具体内容在后文中详细描述。一般的运行步骤如表 1 所示, 在运行相关处理时, DiFX 还附带 errmon 和 m5mon 等程序, 用来监视运行状态和 Mark5 设备状态等信息。

表 1 DiFX 相关处理运行步骤

顺序	操作程序	输入	输出
1	vex2difx	v2d, vex	calc, input, machine, threads
2	calcif2	calc	im
3	Startdifx	input, machine, threads, im	difx
4	difx2fits/difx2mark4	difx, vex, input	FITS/Mark4

理论上, 相关处理在生成 FITS 或者 Mark4 结果文件就算完成, 但实际观测数据处理时往往需要检查钟差、钟速设置是否准确, 生成条纹的质量是否满足要求等。所以相关处理之后还需要进行初步的后处理。DiFX 本身附带安装测地后处理软件 HOPS, 也有条纹幅度和相位显示软件 difxsniff 等。普遍使用的是用 HOPS/fourfit 子程序来检测条纹质量。但 HOPS/fourfit 主要用作测地后处理软件, 对相关处理结果作条纹拟合, 用来生成测地数据库的 type-II 文件。对于天体物理观测, 也可以通过 fourfit 检测前后校准源或参考源的条纹质量。该命令是在执行 difx2mark4 后对生成的 Mark4 格式文件运行, 如 fourfit - pt - c

cf_1234_1234/No0001。其中，命令行参数 `pt` 是输出结果到屏幕，`c` 和 `cf_1234` 是指定 `cf_1234` 作为其控制文件，`1234/No0001` 是 Mark4 格式的第一个 `scan` 的结果文件。图形结果中包含基线对应的条纹信噪比、相位，单通道残余时延，残余时延率，多通道时延和报错代码等信息，可以作为修正钟差、钟速和进一步修正观测结果的依据。

3.1 天体物理学数据处理

DiFX 支持多种天体物理观测数据的相关处理方法：一般的连续谱射电源遵循常规的处理流程；其他还有一些特殊处理方法，比如 ZOOM 技术，多相位中心技术和脉冲门技术等。ZOOM 技术需要在 `v2d` 文件中相应台站设置 `addZoomFreq` 参数信息^[4]，可以选择性地提取感兴趣的频谱位置进行相关，适用于高分辨率的谱线 VLBI 等观测数据的相关处理。多相位中心技术需要在 `v2d` 中相应目标源的设置段添加 `addPhaseCentre` 参数信息^[6]，如子目标源的名称和它们的赤经、赤纬，选取的子目标源位置可以不受干涉仪波束的限制，能够覆盖到干涉仪阵列中单天线的整个主瓣。而且，通过 UV 移位和可见度函数相位调整的方法，DiFX 在多相位中心相关处理时的额外系统开销主要集中在生成前期较高频率分辨率的可见度函数，与子目标源数目无关，多相位中心的总相关处理时间一般约为单目标源的 2.5 倍。脉冲门技术是 DiFX 处理机中实现得较完善的一门技术，但在数据处理过程中需要设计观测实验的科研分析人员和相关处理机操作人员多次沟通，以获得最好的效果。

DiFX 本身带有非相干消色散和脉冲门功能^[16, 20]，还带有通过自相关谱得到脉冲星轮廓辅助设置脉冲门的功能。这些都十分有利于脉冲星的 VLBI 相关处理。对于脉冲星的相关处理，一般需要额外提供两个文件：(1) 通过脉冲到达时刻计算软件 `Tempo` 或 `Tempo2`^[21] 生成的覆盖观测时间段的脉冲到达多项式文件；(2) 脉冲星相位周期的分段文件，包含相位分段的起始和结束位置及对应区间的权重。通过脉冲门技术可以将观测得到的信噪比提高 3 到 5 倍，关于脉冲门的设置一般有两种方法：(1) 将脉冲星相位周期分成多个 `bin`，每个 `bin` 分别生成 FITS 文件，由分析人员通过 AIPS 根据所有的 FITS 文件得到脉冲门的设置^[16, 22]；(2) 通过 DiFX 自带的 `profile` 模式，通过由几个天线组成等效的大口径天线得到的脉冲星轮廓来设置脉冲门。下面将针对一次 CVN 具体观测数据的处理过程，对后一种处理方法做详细说明。

实验观测的是毫秒脉冲星 J1939+2134，利用 CVN 中上海 25 m、昆明 40 m 和乌鲁木齐 25 m 三台站观测，观测时长 8.5 h，采用脉冲星与参考源交替观测的相位参考模式。观测频率为 S 波段，观测带宽 16 个 16 MHz 通道，2 bit 量化，数据率为 $1024 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ 。脉冲星 J1939+2134 的流量密度在 1400 MHz 约为 13 mJy，根据脉冲星幂律谱的特点，J1939+2134 在 2300 MHz 的流量密度小于 10 mJy，已经接近参与观测的 3 条基线最小可检测的范围。因此，需要通过脉冲门技术提高接收的信噪比。在本次实验数据相关处理过程中，应用了 DiFX 的 `profile` 模式辅助设置脉冲门。在 `profile` 模式中，同样需要 J1939+2134 的脉冲到达多项式文件和 `binconfig` 文件。在 `binconfig` 文件中，脉冲星的相位周期被均分成 40 等份，每个 `bin` 的权重设置为 1，并将参数 `SRUNCH` 设为 `FALSE` 输出每个 `bin` 的“自相关谱”。图 2 (a) 为得到的脉冲星 J1939+2134 的轮廓，由该轮廓中脉冲的位置可以设置脉冲门；图 2 (b) 为通过脉冲门技术得到的脉冲星 J1939+2134 的 AIPS 成图^[22, 23]，是一个点源。由此解算的历元

位置为 $19^{\text{h}}39^{\text{m}}38^{\text{s}}.56132$ (RA), $+21^{\circ}34'59''.1256$ (Dec), 考虑到参考架的选取和脉冲星的自行, 与 Parkes 计时得到的历元位置 $19^{\text{h}}39^{\text{m}}38^{\text{s}}.5614$ (RA), $+21^{\circ}34'59''.1244$ (Dec) 符合在毫角秒水平, 也印证了 CVN 观测的正确性^[24]。

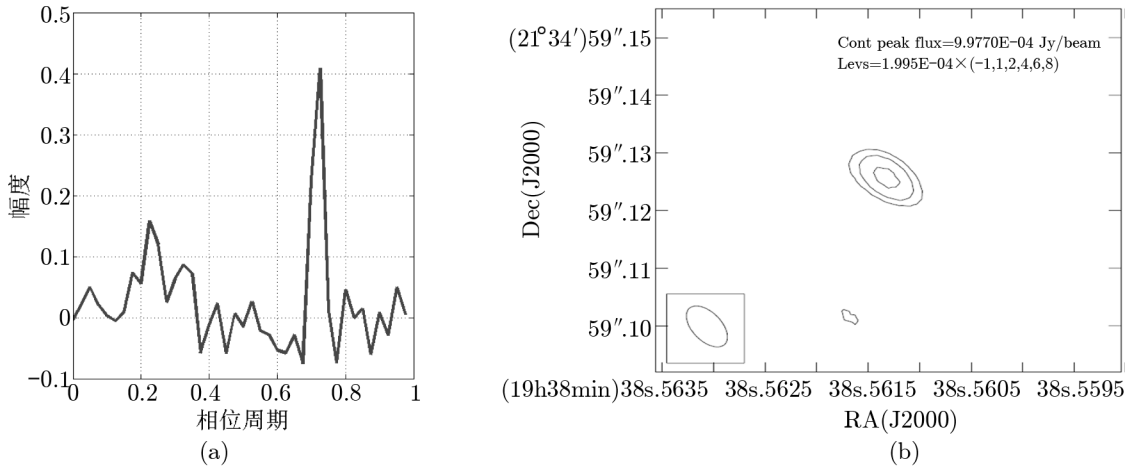


图 2 (a) Profile 模式得到的 J1939+2134 轮廓; (b) J1939+2134 CVN 成图 (beam size= 7.95×4.28 mas)

在 DiFX 脉冲门设置时, 相位周期可根据轮廓任意划分, 权重也可根据脉冲的强弱设置。由此可见, DiFX 在脉冲星 VLBI 观测数据相关处理过程中比其他相关处理机多提供分箱 (bin)、轮廓和脉冲门技术, 能节省搜寻、设置脉冲门的时间和提高设置脉冲门的正确度。

3.2 测地学数据处理

DiFX 因为其模型精度高, 支持 Mark4 输出格式转换, IVS 的主要相关处理中心, 如德国波恩马普射电研究所和美国华盛顿海军天文台等, 都利用 DiFX 进行常规国际 IVS 观测的相关处理。国内上海和乌鲁木齐 VLBI 台站除参加国际测地学联测外, 研究者也利用 CVN 开展类似 IVS 的测地学观测实验, 用来解算台站坐标和监测大陆板块运动等。DiFX 也处理了 2013 年 CVN 的测地学观测实验数据。目前, 结合测地学后处理软件 HOPS, 上海天文台 DiFX 平台可以生成直接供测地学分析软件 Calc/Solve 使用的数据库文件, 还提供规范的相关处理报告, 包括条纹质量统计信息、带宽综合条纹搜索使用的控制文件、台站各通道和 PCAL 信号的状态等。

测地学数据相关处理遵循相关处理的一般模式, 需要增加的是台站 PCAL 信号的提取, 用来校正通道时延和相位。DiFX1.5 以后的版本可以支持对 PCAL 信号的提取, 目前可以支持同时提取单通道内多个 PCAL 信号, 在后处理时再提取指定频点的 PCAL 信息。在生成测地学软件可直接分析使用的 Mark4 格式数据库时, 需要对相关处理结果进行后处理, 校准基线的通道时延和相位, 求取带宽综合时延。目前, 上海天文台也采取和 IVS 相关处理中心同样的后处理软件 HOPS, 利用其中的 fourfit、alist 和 aedit 等子程序^[17], 分析和校准通道的相位和时延。图 3 (a), 图 3 (b) 分别是对测地学实验中一个射电源的相关处理输出校准残余时延和相位后的结果。程序 fourfit 处理的结果能够较完整直观地体现观测台站和数据相

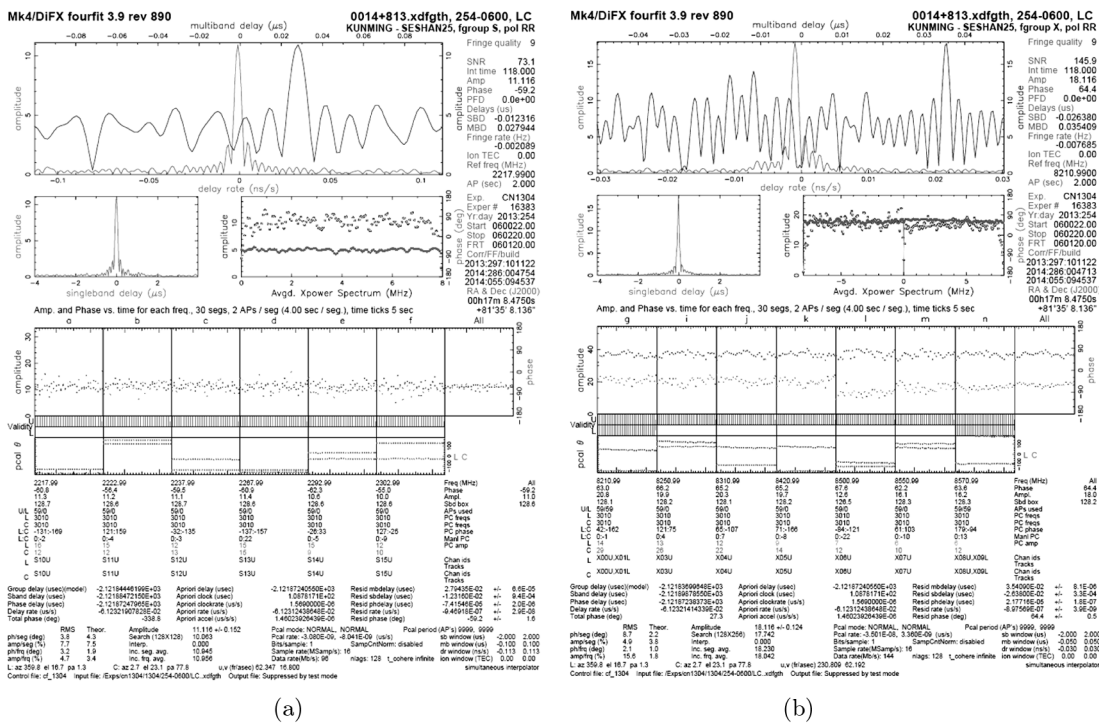


图3 HOPS/fourfit 软件显示的昆明(Kunming)—上海(Seshan25)基线的条纹拟合结果
(a) S波段6个通道的结果; (b) X波段8个通道的结果。

关处理的质量。

如图3(a)和3(b)上、中、下3栏图分别显示条纹搜索的残余带宽综合时延(蓝色)和时延率(红色),单通道残余时延(左)、上下边带通道累加的条纹幅度(右-蓝色)和相位(右-红色),选取的各通道在设定积分时间内的条纹幅度序列(蓝色)和相位序列(红色)以及构成基线的两站在对应通道的PCAL相位序列。同时,文字部分显示了实验相关的观测时间、基线、观测波段、极化、条纹质量、积分时间、各通道的幅度、相位以及时延结果等。此次测地学观测实验设置如下,观测频段S、X波段,其中S波段6个通道、X波段8个通道,其中2个通道同时包含上下边带,每个通道带宽8 MHz,1 bit 量化,数据记录速率256 Mb·s⁻¹;观测时长24 h,采用直接从Mark5读取原始数据的模式,DiFX相关处理用时5.8 h。从图3的处理结果可以看到,这个射电源的昆明-上海基线S波段6个通道观测正常,X波段各通道条纹相位正常,并且S、X波段PCAL信号能够正常提取,单通道残余时延和带宽综合时延能成功获取。

测地学观测需要通过带宽综合的方法得到精确的时延值,带宽综合时延的获得需要在完全补偿台站钟差、钟速的基础上,校准台站设备通道之间的时延和相位误差。正常观测条件下,提取台站PCAL信号相位值直接补偿到通道相位中,该措施可以校正设备误差。但在没有PCAL信号或PCAL信号提取不正确时,后处理软件中fourfit也可以人工校正这些相位差。如图3(a),图3(b)中排列的各通道条纹相位所示,经过校正后的各条纹相位都在同一

水平。在提交给分析人员的数据库文件中, 需要剔除其中因为受电磁干扰或设备影响导致条纹幅度过低的通道, 而且各通道之间的条纹相位差必须控制在一定范围内, 这些都是获得高精度分析结果的保证。

4 讨论和结论

文中主要介绍了 DiFX 相关处理机的特点和处理我国 VLBI 网观测数据的进展; 详细描述了 DiFX 相关处理的一般流程, DiFX 处理天体物理学数据, 特别是脉冲星 VLBI 观测, DiFX 处理测地学数据及其后处理等。目前, 上海天文台 DiFX 平台的搭建和数据处理充分利用 DiFX 移植性高、灵活等优点, 已经成功处理了 CVN 的脉冲星观测数据, 得到了毫角秒脉冲星 J1939+2134 的历元位置。同时, 也处理了 2013 年 3 次测地学观测实验数据, 在当前的硬件配置条件下, 3 台站 24 h $256 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ 测地学观测的相关处理时间为 5.8 h, 充分显示了 DiFX 相关处理机高吞吐率的能力。利用后处理软件 HOPS 与附加软件, 成功生成类似于 IVS 相关处理中心产生的 Mark4 数据库文件和标准相关处理报告。其他如深空探测器 VLBI 观测数据、VLBI 多相位中心的观测数据也在进一步处理中。DiFX 平台已经初步实现天体物理学和天体测量学领域的国内 VLBI 观测数据的相关处理。

后期将考虑扩展 DiFX 硬件平台, 可以处理更高速率、更多台站的观测数据, 如东亚 VLBI 网的天文观测数据处理和参与 IVS 观测数据的相关处理。并将在处理国内外观测数据的同时, 加入到 DiFX 开发行列, 支持更多科学观测, 如近场目标^[25]和空间 VLBI 等, 提高 DiFX 平台的科学产出。也将考虑针对宽带 VLBI 和下一代测地学 VLBI 数据处理, 研究高速相关处理的有效解决途径。另外, 将尽快将 DiFX 相关处理数据归档公开, 为国内外相关领域同行服务。

致谢

作者感谢 DiFX 最初开发者 Adam Deller 博士和 Walter Brisken 博士在 DiFX 安装和运行等方面给予的指导和帮助。感谢德国波恩相关处理小组分享经验和给予的帮助。同时, 还需要感谢上海佘山、天马, 北京密云, 云南昆明和新疆乌鲁木齐台站认真组织各次观测。

参考文献:

- [1] Thompson A R, Moran J M, Swenson Jr G W. Interferometry and synthesis in radio astronomy. Berlin:Wiley-VCH, 2004: 304
- [2] Deller A T, Tingay S J, Bailes M, et al. PASP, 2007, 119: 318
- [3] Deller A T, Brisken W F, Phillips C J, et al. PASP, 2011, 123: 275
- [4] Brisken W. A Guide to the DiFX Software Correlator, version 2.2. <http://cira.ivec.org/dokuwiki/lib/exe/fetch.php/difx/difxuserguide.pdf>, 2013
- [5] Alef W, Rottmann H, Bertarini A, et al. Proceedings of the 20th EVGA Meeting. Alef W, Bernhart S, Nothnagel A, eds. Bonn:MPIfR. 2011, 1: 57
- [6] Morgan J S, Mantovani F, Deller A T, et al. A&A, 2011, 526: A140
- [7] 朱人杰, 张秀忠, 韦文仁, 等. 天文学进展, 2011, 29: 207

- [8] Whitney A R. ASPC, 2003, 306: 123
- [9] Li J L, Guo L, Zhang B. Proceedings of the International Astronomical Union. Jin W J, Platais I, Perryman M A C, eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2007, 248: 182
- [10] 李金岭, 郭丽, 孙中苗. 武汉大学学报信息科学版, 2013, 38: 386
- [11] Zhang X Z, Zhu X Y, Kong D Q, et al. Research in Astronomy and Astrophysics, 2009, 9: 367
- [12] Hao L F, Wang M, Yang J. Research in Astronomy and Astrophysics, 2010, 10: 805
- [13] Yusup A, Liu X, Zhang M. IVS 2011 Annual Report. Baver K D, Behrend D, eds. Washington: NASA, 2012: 115
- [14] 张秀忠, 任芳斌, 郑为民, 等. 天文学进展, 2001, 19: 312
- [15] 郑为民, 舒逢春, 张冬. 宇航学报, 2008, 29: 18
- [16] 闫振, 沈志强, 袁建平. 天文学进展, 2011, 29: 309
- [17] <http://www.haystack.mit.edu/tech/vlbi/hops.html>, 2014
- [18] Whitney A R, Kettenis M, Chris P, et al. IVS 2010 General Meeting Proceedings, Behrend D, Baver K D, eds. Washington: NASA, 2010: 192
- [19] <http://www.jive.nl/verkout/evlbi/>, 2013.
- [20] Guo L, Zheng X W, Zhang B, et al. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2010, 53: 1559
- [21] Hobbs G B, Edwards R T, Manchester R N. MNRAS, 2006, 369: 655
- [22] Greisen E W. Astrophysics and Space Science Library, 2003, 285: 109
- [23] Shepherd M C. ASPC, 1997, 125: 77
- [24] Verbiest J P W, Bailes M, Coles W A, et al. MNRAS, 2009, 400: 957
- [25] Lanyi G, Border J, Benson J, et al. IPN Progress Report 42-162. California: JPL, 2005: 1

The Progress of Adapting DiFX Correlator for Chinese VLBI Network

JIANG Wu^{1,2,3}, SHEN Zhi-qiang^{1,2}, SHU Feng-chun^{1,2}, GUO Li¹,
YAN Zhen^{1,2}, CHEN Zhong^{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: The correlator is crucial in the data processing of VLBI observations. Its output can be used for astronomical imaging, reduction of geodetic measurements and radiometry of spacecraft. DiFX is a well-known software correlator operating in a distributed computing and shared memory environment. The status of the DiFX platform in Shanghai Astronomical Observatory and its progress in the correlation of CVN sessions were reported in the paper. The platform can be used for data correlation of CVN and international VLBI observations. We hope this report could provide some valuable reference to the researchers related.

Key words: radio astronomy; VLBI; DiFX; pulsar; geodesy