



动态双目标VLBI软件相关处理技术研究

张娟^{1,2,3,4}, 郑为民^{1,2,3,4*}, 刘磊^{1,2,3,4}, 童力^{1,2,3,4}, 童锋贤^{1,2,3,4}, 芮萍¹

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, 南京 210023;
3. 国家基础学科公共科学数据中心, 北京 100190;
4. 上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海 200030

*联系人, E-mail: zhwm@shao.ac.cn

收稿日期: 2021-03-20; 接受日期: 2021-05-11; 网络出版日期: 2021-10-19

国家重点基础研究发展计划(编号: 2018YFA0404704)、国家自然科学基金(编号: 11973011, 11573057, 11803070, 11903067)、中国科学院空间科学预研项目(编号: XDA15016100)、中国科学院关键技术人才项目、上海市领军人才项目、上海天文台重点培育项目和探月工程项目资助

摘要 本文介绍了应用于中国VLBI网软件相关处理机(CVNScorr)的动态双目标VLBI相关处理技术. 嫦娥五号(CE-5)实现了我国首次对地外天体的采样返回, 测控目标多、技术难度大. 在交会对接过程中, 需采用实时同波束VLBI技术完成对轨道器、上升器两个动态目标的高精度测轨, CVNScorr需具备2个相位中心同时处理能力. 由于在交会对接、近月制动、动力下降、月面起飞等特殊动力飞行段, 预报轨道精度不高, 无法获得VLBI高精度时延模型, 若采用常规VLBI数据处理方法, 无法获取干涉条纹. 因此, VLBI相关处理机增加了实时双目标条纹搜索与时延模型重构功能. CVNScorr采用FX型软件相关处理机原理, 具备双目标相关处理模块和多信标条纹搜索及时延模型重构功能, 可利用测控信号特点, 自动搜索多个信标, 同时获取两个目标的时延值, 重构高精度的时延模型. CVNScorr运行于CPU+GPU混合并行集群平台, 利用MPI和GPU等技术实现并行计算, 在CE-5任务中实现了中国VLBI网4站双目标实时数据相关处理, 并具有6站双目标数据事后处理能力. 实时数据率达到128 Mbps/站, VLBI时延精度达到0.4 ns, 实时性优于25 s.

关键词 动态双目标VLBI, 同波束, 软件相关处理机, 条纹搜索, 嫦娥五号

PACS: 95.55.Pe, 95.55.Jz, 95.55.Br, 95.75.Kk

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技术^[1], 是目前角分辨率最高的天文观测技术^[2].

VLBI技术联合多个射电望远镜同时进行观测, 效果等同于口径大小为最长基线(一般称射电望远镜间的连线为基线)长度的望远镜.

探月工程从“嫦娥一号”(CE-1)开始, 首次采用了地基无线电测距测速测量和VLBI的联合测轨模式^[3,4].

引用格式: 张娟, 郑为民, 刘磊, 等. 动态双目标VLBI软件相关处理技术研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 119505
Zhang J, Zheng W M, Liu L, et al. Dynamic dual-target VLBI correlator technology (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 119505, doi: 10.1360/SSPMA-2021-0077

由上海站、北京站、乌鲁木齐站、昆明站和上海VLBI中心组成的中国VLBI网(Chinese VLBI Network, CVN)完成月球探测器在国内飞行弧段的VLBI测量. 这一测距测速+VLBI测角模式一直使用至今并不断发展.

当两个临近射电源位于望远镜的同一波束范围内时就构成了同波束观测条件. 同波束VLBI在天文和探测器等观测中已有应用^[5,6]. 美国阿波罗16, 17号任务采用了同波束VLBI进行了登月舱和月球车相对位置测量^[7]. 日本SELENE项目将同波束干涉测量技术用于确定两个小卫星的轨道^[8]. 我国在“嫦娥三号”(CE-3)任务中采用同波束方法, 测量了巡视器和着陆器的相对位置, 精度约1 m^[9]. 上述天文和月球探测应用中, 同波束VLBI的数据处理均采用事后分析方法.

相关处理机是VLBI中心的核心数据处理设备, 具有数据密集与计算密集的特点, 有天文、测地、深空探测等多方面的应用. 目前, 已有多个国家开发了可用于深空探测的VLBI软件处理机, 例如: 欧洲研究基础设施联盟VLBI联合研究所(Joint Institute for VLBI European Research Infrastructure Consortium, JIVE)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跟踪惠更斯卫星降落土卫六过程^[6,10]. 后来又开发了运行于高性能服务器的软件相关处理机SFXC^[11]用于处理天体物理观测. 美国和澳大利亚合作开发了软件相关处理机DiFX^[12], 配有可跟踪探测器的特殊模块. 但这些处理机均只以事后模式对深空探测跟踪进行高精度数据分析, 而没有探测器实时跟踪处理能力.

VLBI相关处理机从算法原理上分有两种类型: FX型^[13]和XF型. 划分的依据是处理流程中快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)和交叉相乘的先后顺序: FX型是先作FFT, 后交叉相乘累加; XF型是先交叉相乘累加, 后FFT. 从实现方式上, 处理机又可分为软件相关处理机和硬件相关处理机. 硬件相关处理机是利用专有FPGA等硬件平台实现相关处理功能. 软件处理机则利用高级语言以专用并程序方式在通用高性能集群系统上实现VLBI相关处理算法. 随着CPU, GPU性能的飞速发展以及商用计算平台性价比大幅提升, 软件相关处理机已经成为了主流.

2004年开始, 上海天文台在探月工程任务的支持下自主开发了国内第一个VLBI软件相关处理机

CVNScorr, 采用FX型, 线程级并行, 运行于4路SMP (Symmetric Multi-Processor)服务器. 该处理机具备单目标处理能力, 在CE-1的前期准备、工程建设、实时任务等阶段的所有VLBI观测的数据处理中得到实际应用^[10,13].

CE-1阶段, CVNScorr实时数据率为16 Mbps/站×4站. 经升级后, 实时数据率为32 Mbps/站×4站, 完成了嫦娥二号(CE-2)任务. 嫦娥三号(CE-3)任务中, 首次在CPU集群平台上, 采用了OpenMP共享内存多线程和MPI (Message Passing Interface)消息传递多进程两级并行结构, 实时数据率达到64 Mbps/站×4站.

探月工程历经多年, 软件处理机不断发展. 从CE-1开始, VLBI软件处理机就是历次探月工程任务VLBI中心的主用处理机. 该处理机除了常规的射电源与探测器信号相关处理功能外, 还具备特有的探测器条纹搜索与模型重构功能, 可在预报模型误差较大时, 对相关处理机时延模型进行快速修正, 保证处理结果的高精度.

CE-5任务在环月飞行段后期, 轨道器返回器组合体(轨返组合体)与着陆器上升器组合体分离. 自此, VLBI的观测目标从1个, 变为了2个. 此后, 还有上升器与轨道器的观测需求. 由于目前我国只有一个VLBI网, 在符合同波束观测条件下, 可以对两个高速运动的探测器同时进行VLBI高精度实时测量, 特别是能够支持上升器从月面起飞后与轨返组合体完成人类首次月球轨道无人交会对接. 这和以往月球探测任务只需跟踪一个目标的情况有极大不同, 需要VLBI相关处理机同时具备两个相位中心处理能力. 同时, 在交会对接、近月制动、动力下降、月面起飞等特殊动力飞行段, 由于预报轨道精度不高, 预报时延模型精度无法满足相关处理机的需求, 需具备对多个信标进行条纹搜索与模型重构的功能.

由于观测两个具有不同运动轨迹的动态目标时, 会出现两种情况(图1): (1) 两个目标的测控信号均落入同一波束, 构成同波束VLBI观测模式; (2) 两个目标的测控信号没有落入同一波束, VLBI测轨分系统采用分时观测模式.

在分时观测时, VLBI相关处理机逐个根据时延模型对两个动态目标进行相关处理; 在同波束观测时, VLBI相关处理机需实时同时处理两个动态目标, 并在25 s内给出相关处理结果——4个观测站的自功率谱

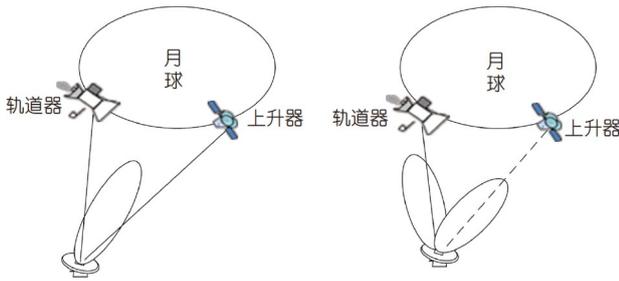


图1 (网络版彩图)轨道器和上升器. 左图是同波束VLBI观测, 右图是分时观测模式

Figure 1 (Color online) The orbiter and the ascender. The left figure shows the same beam VLBI observation mode. The right figure shows the time-share observation mode.

和6条基线的互功率谱.

针对这些需求, 我们开展了动态双目标VLBI软件相关处理技术研究, VLBI软件相关处理机新增了双相位中心、动态双目标相关处理功能和多信标条纹搜索与模型重构功能. 上述功能支持了月球轨道交会对接、动力飞行段上升器与轨道器的实时高精度测轨. 为完成16通道宽带数据处理, 满足实时性要求, 处理机采用了CPU+GPU集群架构.

2 动态双目标VLBI相关处理机原理

在CE-5实时任务中, 北京站、昆明站、乌鲁木齐站、上海站4个射电望远镜观测数据通过e-VLBI技术以128 Mbps/站的码速率传送到上海VLBI数据处理中心(图2).

VLBI中心的软件相关处理机CVNScorr接收到数据后, 首先进行数据预处理^[14,15], 将带有帧头格式的Mark5B数据预处理成秒数据流(以秒为单位分割的数

据流). 当观测目标为探测器时, 启用探测器条纹搜索模块, 读入秒数据流, 经探测器条纹搜索后, 得到残余时延和残余时延率, 联合预报时延模型经探测器时延模型重构模块构造探测器时延模型供相关处理使用. 相关处理输出结果供后处理使用.

2.1 相关处理模块原理

VLBI望远镜终端设备采集记录观测目标的基带信号.

假定地心处基带信号为 $A(t)$, f_0 是各通道的天空频率, 地心处的信号 $G(t)$ 为

$$G(t) = A(t)e^{j2\pi f_0 t}. \quad (1)$$

则望远镜 i 接收到的信号为

$$S_i(t) = G(t + \tau_i) = [A(t + \tau_i) + N_i(t)]e^{j2\pi f_0 (t + \tau_i)}, \quad (2)$$

其中, $N_i(t)$ 为噪声信号. τ_i 为望远镜 i 到地心的时延.

望远镜接收到的信号需要和本振频率混频调解后, 再采集记录, 并通过网络发往VLBI中心.

$$\begin{aligned} R_i(t) &= S_i(t)e^{-j2\pi f_0 t} \\ &= [A(t + \tau_i) + N_i(t)]e^{j2\pi f_0 (t + \tau_i)}e^{-j2\pi f_0 t} \\ &= [A(t + \tau_i) + N_i(t)]e^{j2\pi f_0 \tau_i}. \end{aligned} \quad (3)$$

相关处理机需对望远镜 i 记录的基带信号补偿时延 τ_i 及相位 $2\pi f_0 \tau_i$, 从而将所有望远镜基带信号根据时延模型同步到同一时刻, 然后再交叉相乘、积分, 从而输出自相关和互相关功率谱.

相关处理时, 需根据观测纲要软件提供的时延模型^[16], 将信号波前时刻统一到地心. 对于数字信号, 这一时延修正分为整数比特时延补偿和小数比特时延补

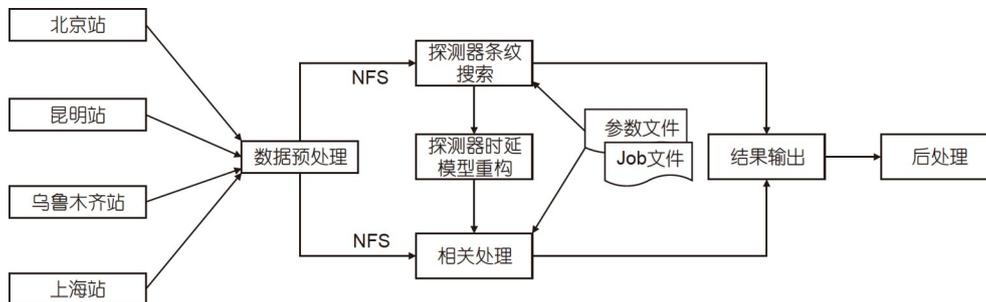


图2 CE-5软件相关处理机CVNScorr结构图

Figure 2 The structure of CE-5 software correlator CVNScorr.

偿两部分.

根据奈奎斯特采样定律, 采样频率 $f_{\text{sample}}=2B$, B 为带宽. 则

$$\tau_i = \tau_{L,i} + \tau_{F,i}. \quad (4)$$

我们称 $\tau_{L,i}$ 为整数比特时延:

$$\tau_{L,i} = \text{round}(2B\tau)/2B. \quad (5)$$

$\tau_{F,i}$ 为小数比特时延:

$$\tau_{F,i} = \tau_i - \tau_{L,i}. \quad (6)$$

整数比特时延补偿通过在时域移动相应的比特位实现, 小数比特时延补偿通过在频域补偿相位实现.

对于FX型软件相关处理机, 各台站信号经补偿同步到同一波前后, 经FFT, 转换到频域; 完成小数比特时延补偿, 再交叉相乘. CVNScorr数据处理流程如图3所示^[17].

(1) 整数比特时延补偿

补偿值 $\tau_{L,i}$ 可根据式(5)计算得到. 在软件实现时, 一个数据段补偿一个时延值. 理论上数据段越短时延补偿的精度越高. 考虑到数组取值、计算量等因素, CVNScorr中数据段长度为

$$l_{\text{segment}} = f_{\text{sample}} \times 4.096 \times 10^{-3}. \quad (7)$$

(2) 条纹旋转

补偿值为 $\varphi_{is} = 2\pi f_0 \tau_{L,i}$.

(3) FFT

软件相关处理机不可能对无限长信号进行处理, 而是通过加矩形窗 $\omega(n)$ 的方式, 连续截取有限时间数据片段:

$$\omega(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq N-1, \\ 0, & \text{其他}, \end{cases} \quad (8)$$

式中, N 是FFT长度, 可以通过参数文件设置. N 越大频谱分辨率越高, 为提高探测器信号频率分辨率, 该值设置可达65536, 对 N 个时域信号采样点做FFT变换:

$$\text{fft}(\omega(n) \cdot f(n)) = W(k) * F(k), \quad (9)$$

其中, $0 \leq k \leq N-1, 0 \leq n \leq N-1$.

CVNScorr的FFT调用了高性能函数库IPP (Integrated Performance Primitives).

(4) 小数比特时延补偿

补偿值为

$$\varphi_k = 2\pi k \Delta f \tau_{F,i}, \quad (10)$$

其中, Δf 为频率分辨率, $0 \leq k \leq N/2-1$.

(5) 基线两端测站交叉相乘

$$\begin{aligned} &(W(k) * F(k)) \cdot (W^*(k) * G^*(k)) \\ &= W^2(k) * (F(k) \cdot G^*(k)), \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $0 \leq k \leq N-1$.

最后通过累加积分后得到各基线互相关功率谱.

在同波束观测段, VLBI同时跟踪轨道器和上升器两个目标. 在相关处理时, 需根据跟踪目标各自的预报时延模型分别补偿. 数据处理流程如图4所示.

2.2 探测器条纹搜索模块原理

条纹搜索程序根据实时节拍读取秒数据流, 将其加载到GPU显存中(图5). 首先进行解码, 把基线两端望远镜采集的数据中指定通道的2比特数据映射成32

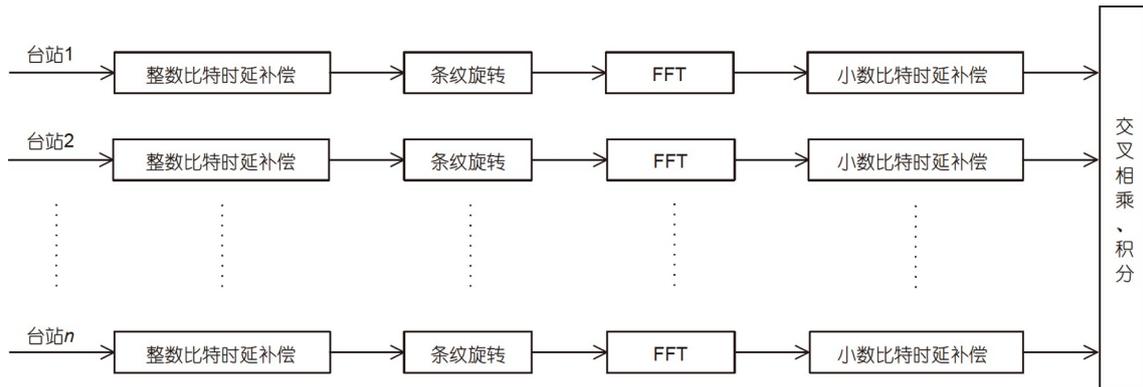


图3 单目标观测段CVNScorr数据处理流程

Figure 3 Data processing flow of CVNScorr in single-target observation mode.

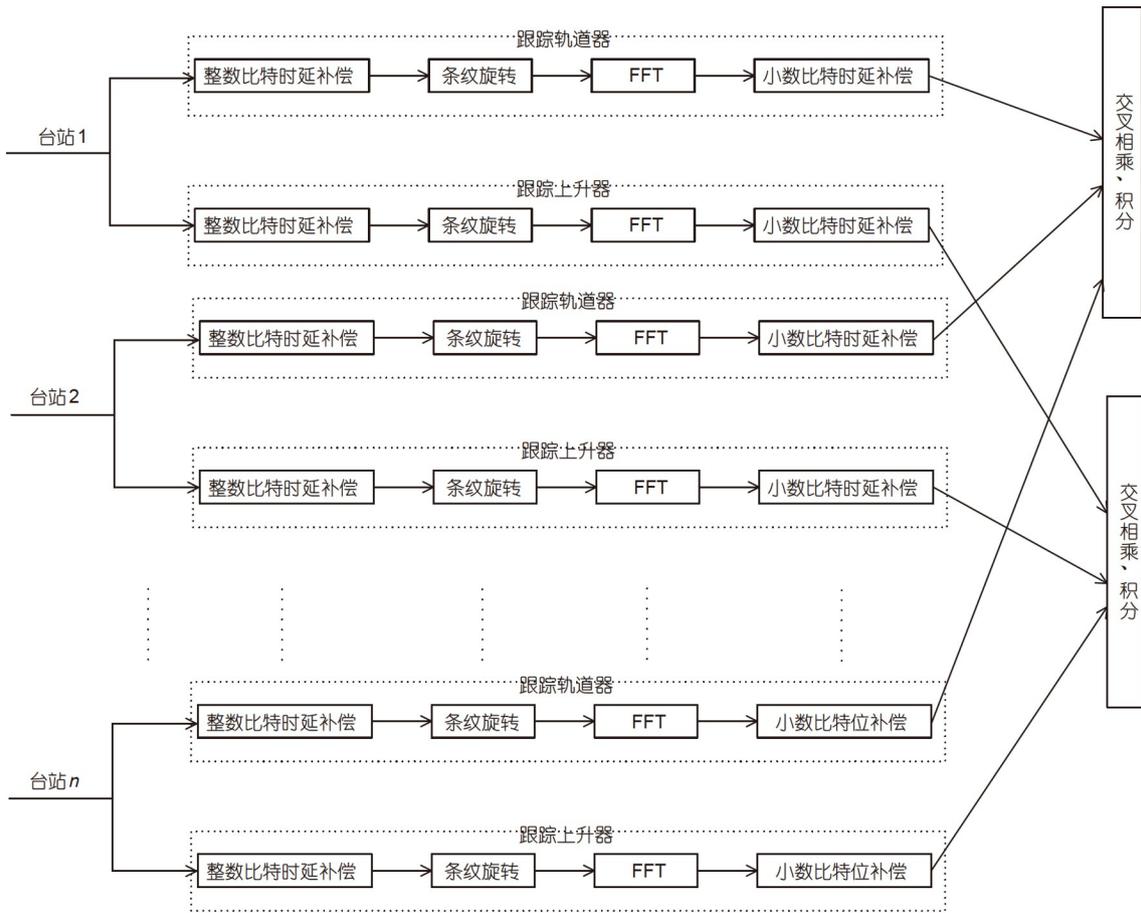


图 4 CE-5任务中动态双目标软件相关处理机数据处理流程
 Figure 4 Data processing flow of CVNScorr in dual-target observation mode in CE-5 mission.

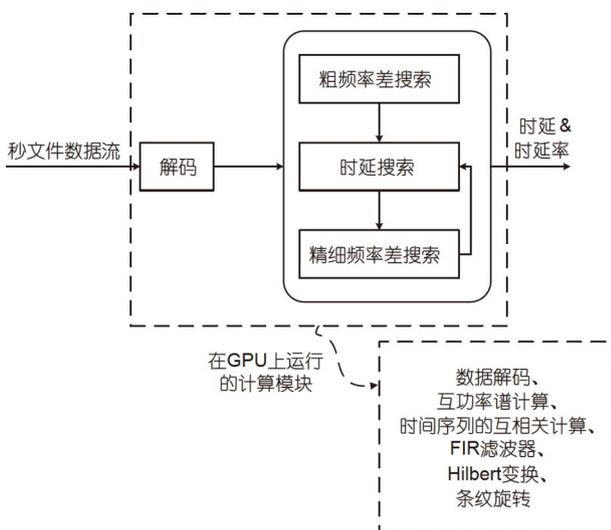


图 5 条纹搜索模块结构图
 Figure 5 The structure of fringe search module.

位浮点数. 之后进行粗频率差搜索, 在不进行频率和时延补偿的情况下进行互功率谱计算, 通过拟合每段互功率谱最高幅度频点相位随时间的变化, 得到初始的频率差. 接下来进行时延搜索, 按照现有频率差对其中一个台站进行条纹旋转, 对齐频率, 开展互相关运算, 得到粗时延值, 之后进行粗时延值和频率补偿, 并进行互功率谱计算. 通过拟合相位随频率的变化, 得到残余时延值, 与粗时延值相加得到总时延.

在精细频率差搜索步骤中, 补偿了上一个步骤计算得到的总时延和频率差之后计算互功率谱, 通过拟合相位随时间的变化得到残余频率差, 与之前得到的频率差相加之后得到精细频率差.

时延搜索和精细频率差搜索过程需反复迭代, 达到迭代次数或者迭代精度之后停止, 输出结果.

每个目标探测器有两套单项差分测距(DOR)信标,

并且根据探测器的姿态和信标组合状态的不同, 在同波束状态下, VLBI实际上接收到的是4个DOR信标的不同组合, 而不是简单的单一信标. 由于轨道及探测器姿态等原因, 信标状态不可能预先精确知晓, 需要VLBI处理机实时进行状态判断.

针对本次任务双目标双频点且频点之间频繁切换的特点, 程序专门进行了多信标搜索与重构功能设计: 通过评估每个目标不同频点信标的的数据质量, 自动从最多4个频点中自动选取有用信号数据, 进行模型重构.

为了节省GPU与CPU直接数据传输时间, 解码、互功率谱计算、互相关计算、FIR滤波、Hilbert变换以及条纹旋转等操作均在GPU上完成. 所有程序均自主开发, 并在实际任务中证明了其稳定性和可靠性.

3 高速计算并行实现方法

3.1 相关处理模块并行实现方法

CE-5动态双目标软件处理机相关处理模块运行于Linux操作系统的集群平台上, 利用MPI将任务分配到多个计算节点上. 计算节点内部利用共享内存的方式实现线程级并行处理. 并行任务以模型周期为粒度划分, 模型周期 P_{model} 为4.096 ms. 模型周期取值需满足 $P_{\text{model}} \geq N_{\text{fft}}/f_{\text{sample}}$. 通常认为在一个模型周期内, 时延近似线性变化. P_{model} 选值尽量小, 可提高计算精度. P_{model} 变小, 并行化任务粒度变小, 影响并行计算效率. P_{model} 选值是一个满足条件下的经验值, 可通过参数文件进行设置. CVNScorr运行需要两个文件: job文件和参数配置文件(s4m_para.txt). 其中, job文件包含观测目标、观测频率、带宽、时延模型等信息; 参数配置文件包括原始数据目录、结果数据目录、模型周期、数据处理起始时间、数据处理终止时间等信息.

CE-5原始记录数据采用Mark5B格式, 带有帧头信息. 帧头包括记录时间信息、秒内帧号、台站信息等. 并行软件架构采用一个台站对应一个输入节点, 主要负责接收e-VLBI发送的原始观测数据、解码, 在缺帧、乱序等情况下, 调整、补偿数据等. 任务分配以模型周期为最小单位. 以5 s数据为一个处理批次, 每批次都将结果写入文件. 在实时VLBI观测时, 处理批次的时间越长, 等待结果的时间越长. 一般收集5 s数

据后, 平均分配到每个计算节点. 计算完毕, 各计算节点分别输出计算结果到指定地址并存放至文件服务器(图6).

3.2 条纹搜索模块并行实现方法

CE-5实时任务期间使用的条纹搜索程序采用并行GPU架构. 此架构计算任务和计算资源不做绑定, 使其可以灵活调整, 在不同硬件资源下可以自动达到负载均衡, 如图7所示. 通过使用GPU加速, 程序运行速度获得了数量级的提高, 使得探月任务的实时性需求得到了保证.

条纹搜索程序运行于GPU集群. 该集群配置7个节点, 每节点两块NVIDIA K80 GPU卡, 一颗20核心Intel Xeon E5-2660@2.6GHz CPU. 实际运行时采用其中4个节点(另外3个作为备份), 每个节点16个计算进程.

在双目标双频点模式下, 计算被划分为240个计算单元, 程序能够在5 s内完成这240个任务单元的处理. 而针对此次任务专门设计的双频点自动选择策略在CE-5历次近月制动、月面降落、月面起飞、交会对接、受控撞月等关键弧段均发挥了重要作用, 有效保证了整个VLBI测定轨系统的实时稳定运行, 证明了此策略的有效性.

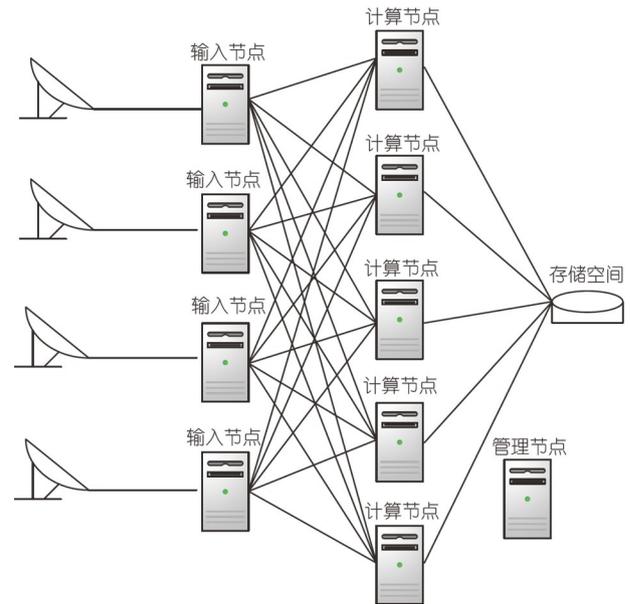


图6 (网络版彩图) CE-5 CVNScorr并行架构, 直线表示数据传递关系

Figure 6 (Color online) Parallel architecture of CE-5 CVNScorr, the lines represent the data transfer relationship.

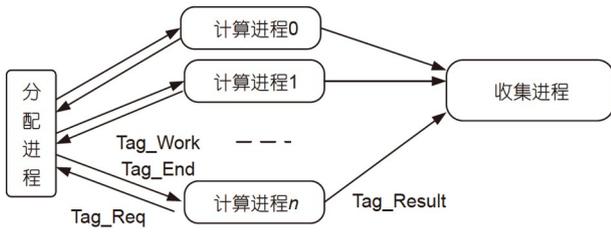


图7 GPU条纹搜索并行架构
Figure 7 Parallel architecture of GPU fringe researcher.

4 在CE-5中的实际应用

采用动态双目标VLBI软件相关处理技术的新型软件处理机作为VLBI中心的核心设备, 在CE-5任务中处理了包括单目标和双目标同波束在内的全部VLBI观测数据.

在UTC时间2020年12月4日14时40分20秒, 上升器和轨道器处于高速运动状态, 两器发送的F3和F2测控信号落入地面VLBI望远镜的同一波束, 具备同波束观测条件. 这些信标是根据空间数据系统咨询委员会(CCSDS)标准设计的DOR信标.

图8显示了在北京站(BJ)-上海天马站(TM)基线上,

5 结论

在CE-5任务中, 动态双目标VLBI软件相关处理技术得到成功应用. 据此研制的软件处理机CVNScorr处理了包括动态双目标同波束在内的全部VLBI观测数据, 实时数据率达到128 Mbps/站, VLBI时延精度达到0.4 ns, 实时性达到25 s. 该处理机不仅完成了探测器近月制动、着陆器动力下降、上升器月面起飞、上升器受控落月关键段数据处理, 还支持了世界上首次月球轨道无人交会对接过程的VLBI远程导引及近程监测.

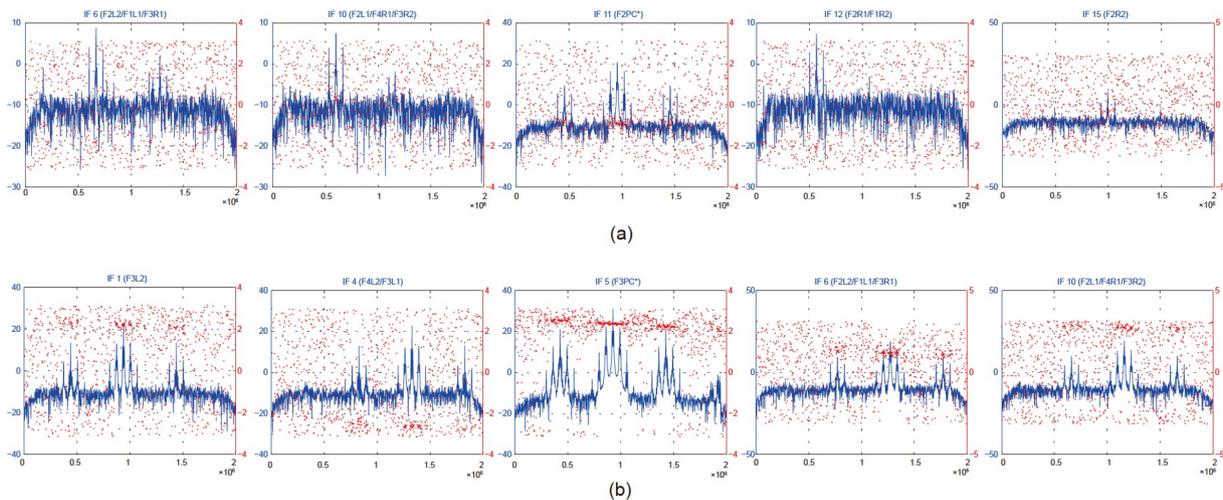


图8 (网络版彩图) CE-5任务中, 2020年12月4日UTC 14时40分20秒, CVNScorr同时跟踪上升器和轨道器动态双目标BJ-TM基线条纹图. 蓝色线为幅度谱, 红色点为相位谱. (a) 轨道器主载波(F2PC)和两对DOR侧音(F2R1和F2L1, F2R2和F2L2)对应的干涉处理结果; (b) 上升器主载波(F3PC)和两对DOR侧音(F3R1和F3L1, F3R2和F3L2)对应的干涉处理结果

Figure 8 (Color online) In CE-5 mission, at 14:40:20 UTC on December 4, 2020, CVNScorr simultaneously tracked two dynamic targets (the orbiter and the ascender), which are the fringes of BJ-TM baseline. The blue lines show the amplitude spectrum and the red dots show the phase spectrum. (a) The fringes of the orbiter's signal (F2PC) and two pairs of DOR side sounds (F2R1 and F2L1, F2R2 and F2L2); (b) the fringes of the ascender's signal (F3PC) and two pairs of DOR side sounds (F3R1 and F3L1, F3R2 and F3L2).

参考文献

- 1 Thompson A R, Moran J M, Swenson Jr. G W. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy. New York: John Wiley & Sons, 1986. 29–33
- 2 Zhu R J, Zhang X Z, Xing Y, et al. An introduction to the VLBI correlator used in the Chinese Lunar Exploration Program (in Chinese). *Prog Astron*, 2008, 26: 62–72 [朱人杰, 张秀忠, 项英, 等. 我国探月工程VLBI相关处理机简介. *天文学进展*, 2008, 26: 62–72]
- 3 Huang Y, Shan Q, Li P J, et al. The application of the seam beam VLBI technique for the orbit determination of CE-5 in the rendezvous and docking phase (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 089511 [黄勇, 单荃, 李培佳, 等. 基于同波束VLBI测量的月球交会对接轨道确定. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 089511]
- 4 Zheng W, Tong F, Zhang J, et al. Interferometry imaging technique for accurate deep-space probe positioning. *Adv Space Res*, 2017, 60: 2847–2854
- 5 Fomalont E B, Goss W M, Beasley A J, et al. Sub-milliarcsecond precision of pulsar motions: Using in-beam calibrators with the VLBA. *Astron J*, 1999, 117: 3025–3030, arXiv: [astro-ph/9903042](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9903042)
- 6 Pogrebenko S V, Gurvit L I, Campbell R M, et al. VLBI tracking of the Huygens probe in the atmosphere of Titan. In: *Proceedings of the International Workshop “Planetary Probe Atmospheric Entry and Descent Trajectory Analysis and Science”*. Lisbon, 2003
- 7 Salzberg I M. Tracking the Apollo Lunar Rover with interferometry techniques. *Proc IEEE*, 1973, 61: 1233–1236
- 8 Hanada H, Iwata T, Liu Q, et al. Overview of differential VLBI observations of Lunar Orbiters in SELENE (Kaguya) for precise orbit determination and lunar gravity field study. *Space Sci Rev*, 2010, 154: 123–144
- 9 Tong F X, Zheng W M, Shu F C. Accurate relative positioning of Yutu lunar rover using VLBI phase-referencing mapping technology (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 3362–3369 [童锋贤, 郑为民, 舒逢春. VLBI相位参考成像方法用于玉兔巡视器精确定位. *科学通报*, 2014, 59: 3362–3369]
- 10 Zheng W M, Shu F C, Zhang D. Application of software correlator to deep space VLBI tracking (in Chinese). *J Astronaut*, 2008, 29: 18–23 [郑为民, 舒逢春, 张冬. 应用于深空跟踪测量的VLBI软件相关处理技术. *宇航学报*, 2008, 29: 18–23]
- 11 Keimpema A, Kettens M M, Pogrebenko S V, et al. The SFXC software correlator for Very Long Baseline Interferometry: Algorithms and implementation. *Exp Astron*, 2015, 39: 259–279, arXiv: [1502.00467](https://arxiv.org/abs/1502.00467)
- 12 Deller A T, Brisken W F, Phillips C J, et al. DiFX-2: A more flexible, efficient, robust, and powerful software correlator. *Publ Astron Soc Pac*, 2011, 123: 275–287, arXiv: [1101.0885](https://arxiv.org/abs/1101.0885)
- 13 Chen Z, Zheng W M. Current status and development of VLBI software correlator (in Chinese). *Prog Astron*, 2015, 33: 489–505 [陈中, 郑为民. VLBI软件相关处理机现状和发展趋势. *天文学进展*, 2015, 33: 489–505]
- 14 Quan Y, Zheng W M. Data preprocessing methods for VLBI applications. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Information Science and Engineering, ICISE2010*. 1940–1943
- 15 Zheng W M, Guo Y. System and method of receiving, decoding and correcting VLBI Mark5B format data used in deep space exploration (in Chinese). China Patent. CN201310422759.4, 2015-04-01 [郑为民, 郭迎. 用于深空探测的Mark5B格式VLBI数据接收解码与纠错系统及方法. 中国专利. CN201310422759.4, 2015-04-01]
- 16 Shu F C, Zhang X Z. Accuracy analysis on model calculation in correlator software package (in Chinese). *Ann Shanghai Obs Acad Sin*, 2001, 22: 100–106 [舒逢春, 张秀忠. 相关处理软件系统中模型计算的精度分析. *中国科学院上海天文台年刊*, 2001, 22: 100–106]
- 17 Liu L, Zheng W M, Zhang J, et al. Precision analysis of Chinese VLBI Network software correlator for geodetic application (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2017, 46: 805–814 [刘磊, 郑为民, 张娟, 等. 中国VLBI网软件相关处理机测地应用精度分析. *测绘学报*, 2017, 46: 805–814]

Dynamic dual-target VLBI correlator technology

ZHANG Juan^{1,2,3,4}, ZHENG WeiMin^{1,2,3,4*}, LIU Lei^{1,2,3,4}, TONG Li^{1,2,3,4},
TONG FengXian^{1,2,3,4} & RUI Ping¹

¹ Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

² Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China;

³ National Basic Public Science Data Center, Beijing 100190, China;

⁴ Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030, China

The dynamic dual-target very long baseline interferometry (VLBI) processing technology applied to the CVNScorr software processor is introduced. Chang'e 5 (CE-5) has achieved China's first sample return mission from an extraterrestrial body. The characteristics of VLBI are that there are several target probes and the telemetry tracking and command (TT&C) technical requirements are high in CE-5. In the rendezvous and docking process, a real-time in-beam VLBI technology is required to perform the high-precision orbit measurement of two dynamic targets, the orbiter and the ascender. In addition, the VLBI correlator (CVNScorr) should tackle two-phase centers from two probes simultaneously. In the special power flight phases such as rendezvous and docking, near-moon braking, powered descending, and lunar takeoff, the VLBI high-precision delay model cannot be derived owing to the low accuracy of the predicted orbit. If the conventional data processing method is adopted, the VLBI fringe cannot be obtained. Therefore, the VLBI correlator should have the function of real-time dual-target fringe search and delay model reconstruction. CVNScorr adopts the principle of FX-type software correlation and has the function of dual-target correlation module, multibeacon fringe search, and delay model reconstruction. By taking advantage of the characteristics of TT&C signals from different probes, multiple beacons fringes are automatically searched and the delay values of the two targets are obtained simultaneously to reconstruct the high-precision delay models. CVNScorr uses MPI, GPU, and other technologies to realize parallel computing, and it is run on a CPU+GPU parallel cluster platform. In the CE-5 mission, the real-time processing capability is up to four stations of the Chinese VLBI Network and the postprocessing capability is up to six stations. The real-time data rate reaches 128 Mbps per station, the VLBI delay accuracy reaches 0.4 ns, and the real-time performance is better than 25 s.

dynamic dual-target VLBI, in-beam VLBI, software correlator, fringe search, CE-5 mission

PACS: 95.55.Pe, 95.55.Jz, 95.55.Br, 95.75.Kk

doi: [10.1360/SSPMA-2021-0077](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0077)