

中国深空网 VLBI 相关处理器开发与应用

韩松涛^{1,2,3}, 唐歌实^{1,2}, 陈 略^{1,2}, 任天鹏^{1,2}, 王 美^{1,2}

(1. 航天飞行动力学技术重点实验室, 北京 100094;

2. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094;

3. 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘 要: 以中国深空网干涉测量信号处理中心建设为背景, 论述了 VLBI 软相关处理系统的设计及初步实现。依据数据处理流程对软件模块化划分, 一方面采用时间并行处理策略, 将数据流按子积分周期分配给多个计算节点; 一方面在相关计算节点内部应用多线程处理最大化提升效能。依托高性能集群系统, 采用两级并行处理策略, 实现了软件的设计开发, 并在“嫦娥 3 号”(CE-3)任务中得到了首次应用。与事后精密轨道的比对分析表明, Δ DOR 测量精度在 1 ns 量级, 相当于 90 nrad 的角位置精度, 等价于地月距离上 37 m 的位置误差。深空干涉测量信号处理中心 VLBI 软相关处理器有效支撑了 CE-3 的精密轨道测定。

关键词: 甚长基线干涉测量; Δ DOR; 中国深空网; 嫦娥 3 号

中图分类号: V556.6

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2015)01-0045-05

引言

甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI) 能够获取目标精确的角位置信息^[1], 从而对传统测距、测速技术形成有益补充, 已被广泛应用于深空探测器轨道测定^[2-5]。通常采用对角距接近的位置精确已知的射电源进行标校观测, 从而实现测量误差修正^[6-7], 称之为 DOR(delta differential one-way ranging) 测量, DOR 测量成功应用于奥德赛火星探测器 (Mars Odyssey)、火星探测漫游者 (MER)、火星勘察轨道器 (MRO)、凤凰号 (Phoenix) 等^[8-10]深空探测任务。

国际上诸多航天机构开展了大量 VLBI 科学研究以及系统建设工作, 用于支撑深空探测任务, 如 NASA(National Aeronautics and Space Adminis-

tration) 所属的深空网^[11]、ESA 深空测控网^[12-13]。国内方面, 中国 VLBI 网 (China VLBI Net, CVN) 由上海佘山站和天马站、北京密云站、昆明凤凰山站、乌鲁木齐南山站等 5 个测站组成, 在探月工程嫦娥工程等任务中发挥了重要作用。

本文以中国深空网建设为背景, 论述了深空网干涉测量信号处理中心软相关处理器的设计开发, 并以“嫦娥 3 号”(CE-3)任务中的应用为例, 验证相关处理器的性能。

1 中国深空网简介

中国深空网由佳木斯 66 m 深空站、喀什 35 m 深空站 (表 1) 以及深空网干涉测量信号处理中心组成, 两深空站组成的基线方向近东西向, 基线长度约 4 350 km。

深空网干涉测量信号处理中心位于北京航天

飞行控制中心(图1)。其主要职能包括:组织深空网干涉测量的实施以及状态监视、国际联测组织协调、制定观测纲要、数据处理分析、数据管理等。

表1 中国深空网测站信息

测站	JMS	KSH
天线口径/m	66	35
S波段下行/GHz	2.2	2.2
X波段下行/GHz	8.4	8.4
Ka波段下行/GHz	—	32
上行频段	S/X	S/X
数据采集格式	VSI/VSR	VSI/VSR

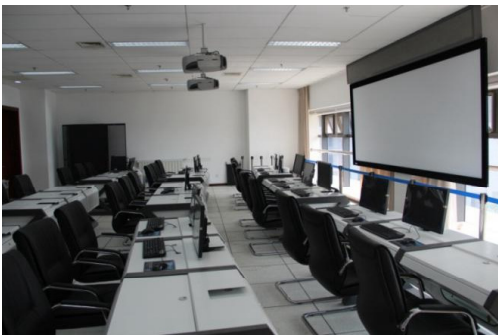


图1 干涉测量中心操控机房

2 软相关处理系统

深空网干涉测量信号处理中心的核心职能是干涉测量数据处理分析,BSCS(BACC software correlator system)软相关处理器负责实现原始干涉测量数据的处理分析。

2.1 相关处理算法简述

VLBI测量的基本原理以及数据处理算法在多个文献中予以了论述,可参考文献[14]。在各种处理算法实现中,“FX”型相关处理算法应用较为普遍,其具体实现方式被多个相关处理软件采用,如Difx、K5++^[15-16]。

相关处理计算的核心是从时域、频域、信噪比等角度提升两路信号的相关性,其中“FX”型相关处理算法的基本步骤包括整数bit补偿、条纹旋转、FFT变换、小数bit补偿;由于时延观测精度受采集信号带宽的影响,通常VLBI观测采

用带宽综合方式来提升观测精度。

2.2 并行处理设计

VLBI测量具有高数据率的特点,数据处理过程是一个具有高度并行性的运算过程,需要在软件设计、数据处理算法实现过程中采用高效的并行处理策略,从而提升深空网干涉测量信号处理中心的运行效率。

通过对基线并行、测站并行、通道并行以及时间并行4种并行处理策略的比对分析,时间并行具有计算量小、节点间通信量小以及扩展灵活等优势^[17],因此在并行设计方面采用时间并行处理策略(图2)。

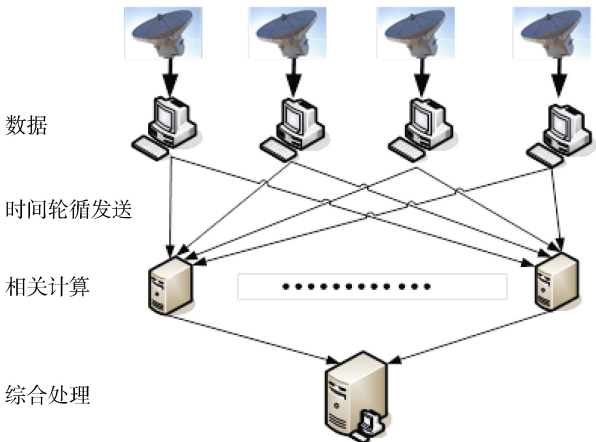


图2 时间并行结构设计

时间并行结构采用轮循方式处理数据,将获取数据以时间标识为基准发送给不同的相关处理节点来处理,即每个相关节点处理所有测站的某一子积分时间段的数据,各子积分时间片的数据由不同的相关节点处理。从而实现多个相关计算节点的并行处理。

而在每个计算节点内部,利用节点服务器的多核CPU配置,启用多线程处理策略,同样采用时间并行处理方式,各计算线程负责计算不同时标段的数据,从而使处理效率性能最大化。

相关节点计算结束后,将结果发送给后处理节点,完成积分周期数据的积分处理,并应用最小二乘准则计算残余时延。

2.3 处理系统

软相关处理器运行于高性能集群处理系统(图3)。集群内各节点服务器按功能进行划分,集群内各节点通过 InfiniBand 网络采用 MPI 协议进行通信,实现集群系统资源的统一调配。

管理节点由单台节点服务器组成,负责互谱计算、积分、观测量求取、日志记录等功能。

相关计算节点由多台高性能服务器组成,直接体现了系统的并行结构设计。相关计算节点承担主要计算任务,包括条纹旋转、FFT 变换、小数 bit 补偿、子积分计算等,相关计算节点数可灵活扩展,以满足后续更高数据率的数据处理需求。计算节点内部多线程计算结构如图4所示。



图3 集群处理系统

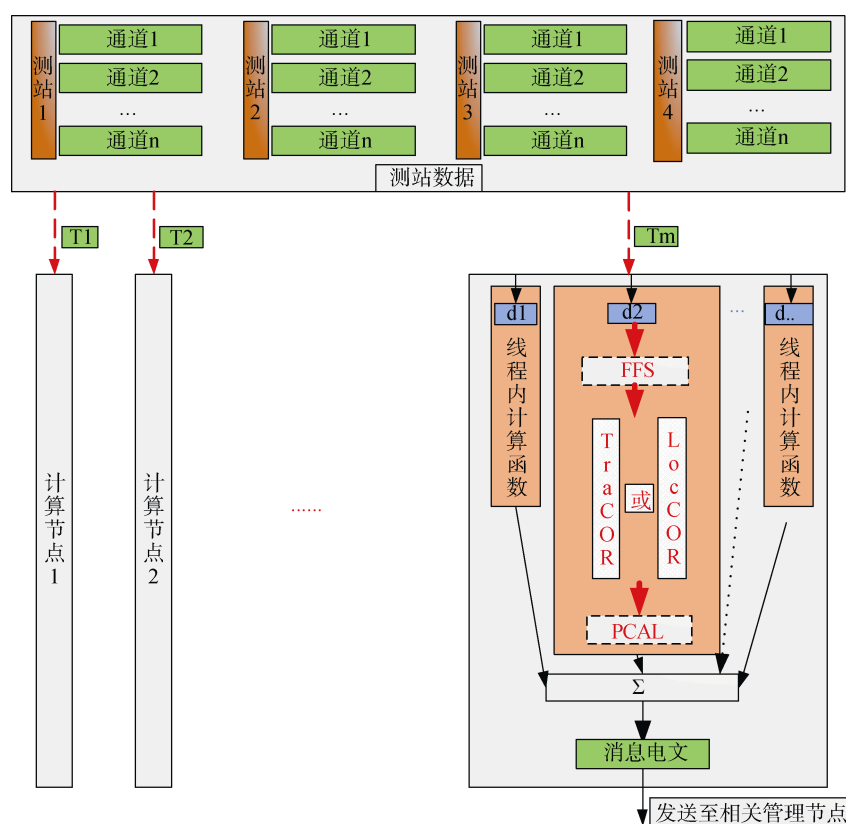


图4 计算节点内部多线程计算结构

软件采用事后处理分析模式,在软件开发过程中预留了实时数据流接收接口,用于后续实时处理功能的扩展。

3 CE-3 任务应用情况

CE-3 成功软着陆于月表虹湾区,并释放“玉

兔号”月球车, 标志着我国探月二期工程取得圆满成功。在 CE-3 整个飞行期间, 中国深空网采集记录干涉测量数据, 连同测站辅助测量数据一并传输至干涉测量信号处理中心, 利用 BSCS 软件进行事后精处理分析, 分析结果于 24 小时内向定轨分系统提供, 用于飞行器精密轨道确定。

在高精度轨道确定过程中, 应用到的观测量包括深空网测距、测速数据、CVN 网干涉测量数据以及深空网干涉测量时延、时延率观测量。统计分析表明, 深空网干涉测量时延精度在 1 ns 量级 (结合深空网基线长度, 角位置精度约 90 nrad, 相当于地月距离上 37 m 的位置误差); 时延率精度在 1 ps/s 量级。图 5、图 6 显示了环月轨道段的观测量结果。

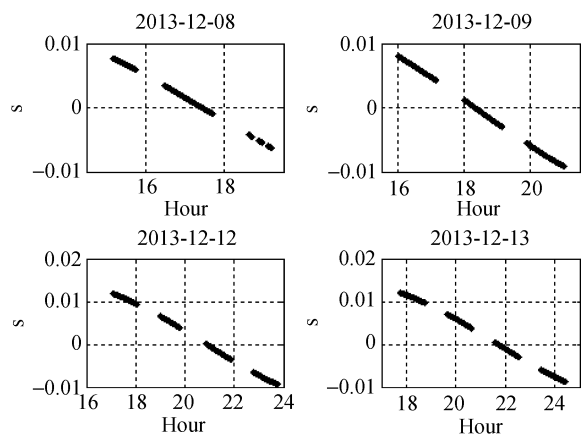


图 5 环月轨道时延观测量

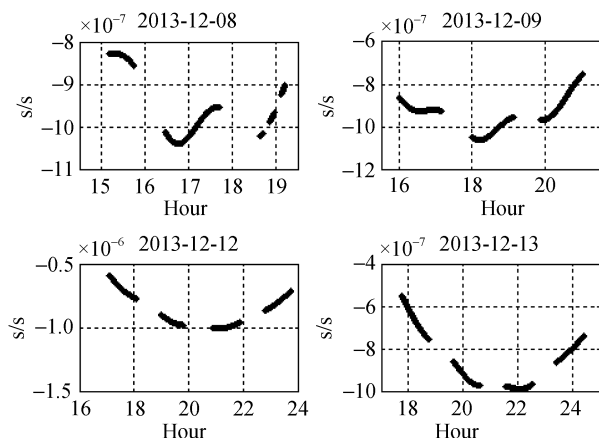


图 6 环月轨道时延率观测量

4 结束语

为支撑我国月球、火星探测等深空探测任务,

中国深空网测站、相关处理中心初步落成, 并在 CE-3 任务中得到了成功应用; 后续规划在南美区建设第 3 个深空测站, 届时中国深空网将会具备更丰富的基线构型, 有望进一步提升深空探测器的导航精度。

参考文献

- [1] 李海涛, 郝万宏. 深空导航无线电干涉测量技术的发展历程和展望[J]. 飞行器测控学报, 2013(32): 470-478.
- [2] Liu Q. High Accuracy VLBI and Application in Deep Space Exploration [C]// Proceedings of Chinese Astronomical Society. 2011: 320-325.
- [3] Bagri D S, Majid W A. Estimating Accurate Relative Spacecraft Angular Position from Deep Space Network VLBI Phases Using X-band Telemetry or Differential One-Way Ranging Tones [R]// The Interplanetary Network Progress Report. 2007.
- [4] 朱新颖, 李春来, 张洪波. 深空探测 VLBI 技术综述及我国的现状和发展[J]. 宇航学报, 2010, 31(8): 1893-1899.
- [5] 于志坚. 深空测控通信系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 122-125.
- [6] 吴伟仁, 王广利, 节德刚, 等. 基于 Δ DOR 信号的高精度 VLBI 技术[J]. 中国科学: E 辑, 2013, 43(2): 185-196.
- [7] Ruggier C J, Martin T J. Delta differential one-way ranging [R]. DSMS Telecommunications Link Design Handbook, 2004.
- [8] Border J S. Innovations in Delta Differential One-Way Range: from Viking to Mars Science Laboratory [C]// The 21st International Symposium on Space Flight Dynamics. Toulouse, France, 2009.
- [9] Lanyi G, Bagri D S, Border J S. Angular Position Determination of Spacecraft by Radio Interferometry[C]// Proceedings of the IEEE. 2007, 95: 2193-2201.
- [10] Curkendall D W, Border J S. Delta-DOR: the One-Nanoradian Navigation Measurement System of the Deep Space Network: History, Architecture, and Componentry[R]// The Interplanetary Network Progress Report. 2013.
- [11] Thornton C L, Border J S. Radiometric Tracking Technique for Deep Space Navigation[M]// Deep Space Communications and Navigation Series. 2000.
- [12] James N R, Abello M L. Implementation of an ESA Delta-DOR Capability[J]. Acta Astronautica, 2009(64): 1041-1049.

- [13] Roberto M, Trevor M, Ricard A. Delta-DOR a New Technique for ESA's Deep Space Navigation[J]. ESA Bulletin, 2006(128): 69-74.
- [14] 唐歌实. 深空测控无线电测量技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 81-99.
- [15] Deller A T, Tingay S J, Bailes M. DiFX: a Software Correlator for Very Long Baseline Interferometry Using Multiprocessor Computing Environments [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2007(119): 318-336.
- [16] Böhm J, Nilsson T. The new vienna VLBI Software VieVS [J]. Geodesy for Planet Earth, 2012(136): 1007-1011.
- [17] 韩松涛, 唐歌实, 刘成军, 等. VLBI 并行处理方式比较分析[J]. 遥测遥控, 2013, 34(1): 29-33.

Development and Application of Correlator in Interferometric Tracking Center of China DSN

Han Songtao^{1,2,3}, Tang Geshi^{1,2}, Chen Lue^{1,2}, Ren Tianpeng^{1,2}, Wang Mei^{1,2}

(1. *National Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics, Beijing 100094, China;*

2. *Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China;*

3. *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)*

Abstract: This paper presents the correlator software system in the interferometric center of China Deep Space Network and its first implementation performance in China CE-3 project. The correlator is designed to run in clusters combined with high performance computers. Based on time parallel strategy and multi-threads processing, the parallel processing algorithm is analyzed. The performance of the correlator software in China CE-3 project is discussed. Compared with high accuracy orbit ephemeris, the observable error in DOR measurement of the correlator software is on the scale of 1ns, which corresponds to an angular accuracy of about 90nrad or 37 m's uncertainty on the probe position at 380 000 km. The interferometric tracking center has played an important role in CE-3 navigation.

Keywords: VLBI; DOR; China DSN; CE-3