

DOI:10.13203/j.whugis20180114



文章编号:1671-8860(2018)12-2093-06

基于超算的全球电离层模型快速并行解算

施 闯^{1,2} 王 成^{3,2} 张 涛¹

1 北京航空航天大学电子信息工程学院,北京,100083

2 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

3 北京航空航天大学前沿科学技术创新研究院,北京,100083

摘 要:为应对日益丰富的观测数据以及数据再处理对高性能计算的需求,开发了基于 OpenMP 以及 MPI (Message Passing Interface) 并行计算的全球电离层快速建模算法。采用武汉大学超级计算机对全球电离层建模效率进行了不同并行计算方案的实验。结果表明,采用多节点 MPI 并行计算能够极大地提高数据处理效率,相比传统单节点串行计算提高了近 30 倍,相比单节点 OpenMP 并行计算提高了近 3~4 倍。MPI 并行计算方案充分利用了丰富的计算机资源来提高全球电离层建模效率,对电离层建模算法的快速测试、产品的重新再处理具有重要作用,对多系统全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)快速精密定轨、大规模 GNSS 网解也有较好的参考价值。

关键词:全球电离层模型;超级计算机;并行计算;多线程

中图分类号:P228

文献标志码:A

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)是目前测量电离层总电子含量(total electron content, TEC)精度最高的观测手段。采用 GNSS 地面跟踪观测数据可对电离层进行长期连续监测,通过建立全球、区域电离层模型可揭示电离层 TEC 的时空分布特征及变化规律,并为单频 GNSS 接收机用户提供电离层延迟改正,从而提高导航定位精度^[1]。自 1998 年以来,国际卫星导航服务机构(international GNSS service, IGS)电离层工作组根据全球 IGS 跟踪站观测数据建立全球电离层模型并提供较高精度的全球电离层产品,为电离层研究和卫星导航定位奠定了良好的基础^[2]。2016 年,中国科学院和武汉大学加入 IGS 电离层工作组,进一步提高了全球电离层产品的精度和可靠性^[3]。GNSS 的发展,尤其是我国北斗卫星导航系统全球组网的迅速发展,将带来更加丰富的电离层观测资料,促进全球电离层模型精度的进一步提升。一方面,日益丰富的观测数据会使得数据处理的时间不断增加,从而影响电离层产品的快速发布。目前,IGS 电离层工作组各分析中心的快速产品、最

终产品分别延迟大约 1~2 d、3~10 d。另一方面,数据处理策略的调整与算法的更新有利于进一步提升全球电离层产品精度。而数据再处理是十分耗时的工作,因此,如何大幅提高全球电离层的建模效率是当前迫切需要解决的问题。并行计算是一种同时利用更多的计算资源来提高数据处理效率的有效途径。其中,利用 OpenMP 多线程并行计算来加速数据处理已应用于多个学科领域,如卫星重力数据处理、卫星遥感反演、地球重力场反演等^[4-8]。但是,仅采用单处理器难以满足大规模的科学与工程计算。超级计算机能够用于重大的科学研究、国防尖端技术和国民经济领域的大型计算与数据处理任务。本文将探讨利用超级计算机丰富的计算资源来提高全球电离层建模效率的方法,对电离层建模的策略及算法测试以及数据再处理与分析等具有重要的现实意义。

1 超算与 MPI 并行计算

超级计算机主要用于国家高科技领域和尖端技术研究,是国家科技发展水平和综合国力的重

收稿日期:2018-08-23

项目资助:国家自然科学基金(41804026);国家重点研发计划(2016YFB0501802)。

第一作者:施闯,博士,教授,国家杰出青年,“长江学者”特聘教授,主要从事卫星导航定位理论与方法研究。shi@whu.edu.cn

通讯作者:王成,博士。acex@foxmail.com

要标志。中国超级计算机进入全球超级计算机500强的数量已达160多台。截止到2018年6月,中国“神威·太湖之光”以每秒9.3亿亿次的浮点运算速度一直位居世界第一,“天河二号”以每秒3.39亿亿次排行第二。另外,部分科研院所及高校也建设了不同规模的超算中心。武汉大学超算中心由415台机架服务器、7632颗CPU组成,计算能力超过3万台普通个人计算机,秒算接近300万亿次。该中心是武汉大学2015年重点建设的教学科研支撑服务平台,除承担大规模科学计算和工程计算任务外,也将以其强大的数据处理和存储能力为社会提供云计算服务,支持重大课题或协作研发项目。

利用超算执行计算任务主要有两种方式:

①将总任务划分为多个子任务分别提交到多个节点执行,每个子任务仅在一个节点执行,简称为多任务单节点并行。②将单个任务的数据处理提交到多个节点执行,简称为单任务多节点并行。多任务单节点并行时,每个子任务也可采用OpenMP实现多线程并行计算,而单任务多节点并行则需要多个节点进行消息传递。对于历年的数据再处理,任务数量较大,推荐采用多任务单节点并行;而对于少量任务,如算法测试等,采用单任务多节点并行计算更为合适。

Message Passing Interface (MPI)是一种消息传递接口的标准,它的具体实现主要有Intel MPI、MPICH、OpenMPI等,支持Fortran和C/C++编程语言。MPI的本质功能是为多个计算节点中进程间通信提供基础,具有实用、高效和灵活的特点。利用MPI实现多节点并行计算的基本路线较为清晰,首先启动MPI环境,主程序将任务划分为多个子任务,并将消息发送给其他节点;然后各节点接收消息并执行各自的计算任务,完成任务后发送消息给主程序;最后主程序接收其他节点消息,结束MPI环境,输出相应结果。一般情况下,MPI并行计算的执行过程如图1所示,其中主程序所在的节点标识号为0。

2 全球电离层建模的MPI并行算法

2.1 全球电离层建模基础理论

在日固地磁参考系下的球谐展开进行建模,所有观测卫星和地面测站的差分码偏差(differential code bias, DCB)和球谐系数一起参与解算^[9-10]。建模的基础理论推导如下:首先由

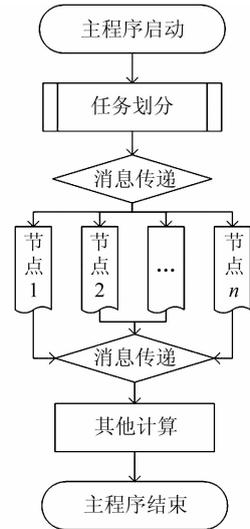


图1 MPI并行计算的执行过程

Fig. 1 The Executing Process of MPI Parallel Computing

GNSS基础观测方程可知:

$$P = \rho_0 + c(\Delta t_r - \Delta t_s) + T + I + c(b_r + b_s) + \varepsilon \quad (1)$$

式中, P 为伪距观测值; ρ_0 为卫星至接收机的几何距离; c 为光速; Δt_r 为接收机钟差; Δt_s 为卫星钟差; T 为对流层延迟; I 为电离层延迟; b_r 为接收机硬件延迟; b_s 为卫星硬件延迟; ε 为测量噪声。由双频P码测量可得:

$$P_1 - P_2 = I_1 - I_2 + c(b_1^r - b_2^r + b_1^s - b_2^s) \quad (2)$$

进而得:

$$P_1 - P_2 = \frac{40.3(f_2^2 - f_1^2)}{f_1^2 f_2^2} \text{STEC} + c(\text{DCB}_r + \text{DCB}_s) \quad (3)$$

式中, f_1 、 f_2 为双频载波相位的频率;STEC为斜路径总电子含量; DCB_r 为接收机差分码偏差; DCB_s 为卫星差分码偏差。

投影函数采用与CODE(the Center for Orbit Determination in Europe)相同的MSLM(modified single-layer model mapping function):

$$m(z) = \frac{1}{\cos z'}, \quad \sin z' = \frac{R}{R+H} \sin(\alpha z) \quad (4)$$

式中, m 为投影函数; z 为测站天顶距; z' 为电离层穿刺点处的天顶距; R 为地球半径; H 为假设的电离层薄层高度。当 $\alpha=0.9782$, $H=506.7$ km时,该投影函数与喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的ESM(Extended Slab Model)投影函数符合得最好。

用于描述天顶总电子含量的球谐模型为:

$$\text{VTEC}(\varphi, \lambda) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin \varphi) (a_{nm} \cos(m\lambda) + b_{nm} \sin(m\lambda)) \quad (5)$$

式中, VTEC 为天顶总电子含量; φ 为地磁纬度; λ 为日固经度; n 和 m 为球谐模型的阶次; \tilde{P}_{nm} 为标准勒让德多项式; a_{nm} 和 b_{nm} 为待求的球谐系数。

将式(4)、式(5)代入式(3), 得到全球电离层模型的观测方程:

$$\begin{aligned} \text{VTEC} + \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_2^2 - f_1^2)} \cos z' \cdot c(\text{DCB}_r + \\ \text{DCB}_s) = \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_2^2 - f_1^2)} \cos z' \cdot (P_1 - P_2) \end{aligned} \quad (6)$$

本文在建模过程中采用的模型阶次为 15×15 , 单天解包含 13 组待估球谐系数, 卫星(32 颗)和测站接收机(330 个)的 DCB 一天内作为一个未知常量, 并设所有观测卫星 DCB 之和为零, 总共解算参数 $16 \times 16 \times 13 + 330 + 32 = 3\ 690$ 个。

2.2 MPI 并行计算方案

结合全球电离层建模的基础理论与 MPI 并行计算技术, 可将基于超算的全球电离层快速建模过程分为以下步骤。

1) 主程序将总任务均衡划分为多个子任务, 即将参与全球电离层建模的 330 个 GNSS 接收机观测文件尽可能平均地提交给参与计算任务的各个节点进行处理。如有 10 个节点参与计算, 那么每个节点仅需处理 33 个观测文件。

2) 主程序进入 MPI 环境, 将划分的子任务作为消息发送给参与任务的多个节点。消息内容为字符串(各个节点需要处理的文件列表)。

3) 参与任务的各个节点接收消息后开始对各自分配的观测文件执行数据预处理任务, 包括数据质量检核、周跳探测、相位平滑伪距等。

4) 各节点完成数据预处理任务后继续执行核心计算任务, 包括与 RINEX(receiver independent exchange format) 观测数据的读取、电离层穿刺点及勒让德多项式的计算、法方程的叠加等。这部分计算任务主要根据上文全球电离层建模基础理论来实现。

5) 各节点执行完各自的任務后, 发消息给主程序所在节点并告知已完成计算任务;

6) 主程序接收各节点发送的信息并确认所有子任务均执行完毕后结束 MPI 环境, 开始合并且解算法方程, 然后根据求解的球谐系数计算 TEC, 并以 IONEX(ionosphere exchange format) 格式输出全球电离层产品。

根据全球电离层建模的基础理论可知, 该方案的核心计算在于读取 GNSS 观测文件, 获取电离层穿刺点及勒让德多项式并叠加到法方程。该

计算过程相当耗时, 而采用超级计算机多个节点可同时并行地执行这部分计算, 节省大量时间。同时, 单个节点上也采用 OpenMP 多线程并行计算, 将接收的任务再一次均衡划分给各个线程去执行计算, 进一步提升了数据处理效率。所以, 理论上这种并行计算方案比传统的串行计算效率可提升 $n \times m$ 倍(其中, n 为节点数, m 为 CPU 核心数)。当然, 实际情况中由于任务不可能被 100% 均衡划分, 主程序包括一部分串行计算, 且不同节点 CPU 性能可能存在差异等原因导致数据处理效率提升倍数低于理论值。

3 实验与分析

3.1 实验环境

本文采用武汉大学超算中心的 3 个计算分区(分别是 hpxg、hpib、fat)进行实验。其中 hpxg 与 hpib 分区节点的配置为 CPU 型号 Intel Xeon E5-2630, 主频 2.4 GHz, 16 核, 内存 96 GB DDR4, 硬盘 240 GB SSD; fat 分区节点的配置为 CPU 型号 Intel(R) Xeon(R) CPU E7-8880, 主频 2.2 GHz, 176 核, 内存 4 TB DDR4, 硬盘 500 GB SSD、8 TB HDD。实验采用 2016 年某天全球约 330 个 IGS 站的全球定位系统(global positioning system, GPS)观测数据来建立全球电离层球谐函数模型。

3.2 单节点多线程并行

由于单个计算节点存在 16 个核心, 可以采用多线程技术来提高数据处理效率。Windows、Linux、Mac OS 等主流操作系统对多线程均有较好的支持。如 Windows 以 Win32 API 提供多线程应用程序开发所需的接口函数, Linux 也定义了有关线程创建和操作的 API(application interface), 形成 POSIX thread 通用线程库。而 OpenMP 则更加易用且跨平台表现良好, 十分易于将现有的串行程序改写为多线程并行计算程序。OpenMP 不用像 Win32 API 和 POSIX thread 编写创建、关闭线程等基础操作代码, 只需在循环前加上相应的制导语句即可激活多线程并行计算。在超算中心 hpxg 分区提交任务测试不同线程数量时的数据处理效率, 如图 2 及表 1 所示。

由图 2 及表 1 可知, 仅采用单线程时, 整个数据处理时间大约需耗时 2 h, 而采用两个线程时, 所需时间减少一半(约 1 h)。随着线程数的增加, 相应的耗时也近似呈比例下降。当线程数为 16 时, 耗时最少为 12.77 min, 数据处理效率约为单

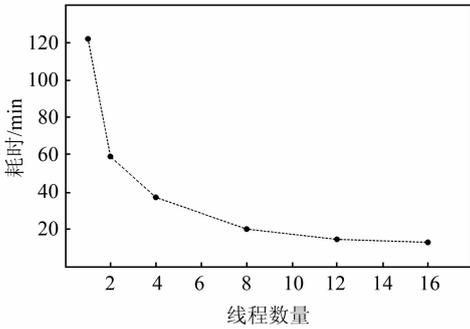


图2 hpxg分区不同线程数量时建模的数据处理耗时
Fig. 2 Time Consumption of the Modeling with Different Number of Threads Under hpxg Section

表1 hpxg分区不同线程数时建模所消耗的时间

Tab. 1 Time Consumption Table of the Modeling with Different Number of Threads Under hpxg Section

线程数	时间/min
1	121.87
2	58.88
4	36.97
8	19.90
12	14.52
16	12.77

线程时的10倍。值得注意的是,由于CPU的计算资源是固定的,线程数应保持与CPU核心数一致才能最大程度地发挥多线程的并行计算效能,如增加更多的线程数反而会造成线程对CPU资源的争抢,从而浪费时间,降低效率。此外,一方面不可能对各线程实现100%的均衡负载,另一方面主程序也不太可能完全并行执行,一定存在部分串行计算过程。因此,应尽可能地将串行计算部分更改为并行计算来提升数据处理效率。

3.3 fat节点多线程并行

fat节点有着比普通节点更强大的处理器、更大的内存,一般用来处理大内存需求应用的计算任务。在超算中心fat分区提交任务测试不同线程数量时的数据处理效率,如图3及表2所示。

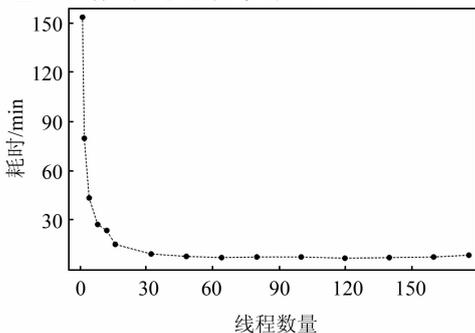


图3 fat分区不同线程数量时建模的数据处理耗时
Fig. 3 Time Consumption of the Modeling with Different Number of Threads Under fat Section

表2 fat分区不同线程数时建模所消耗的时间表

Tab. 2 Time Consumption Table of the Modeling with Different Number of Threads Under fat Section

线程数	时间/min
1	153.34
2	79.51
4	43.31
8	27.09
16	15.20
32	9.28
64	7.17
120	6.75
176	8.41

由图3及表2可知,随着线程数量的增加,数据处理所需时间逐渐降低,尤其从单线程到少数多个线程时,效率成倍提升。当采用单线程时,fat分区数据处理耗时(约2.5h)比hpxg分区(约2h)更多的主要原因在于fat分区节点的CPU主频(2.2GHz)低于hpxg分区(2.4GHz)。但当线程数超过一定数量(大约48)时,数据处理耗时几乎不再发生显著的变化,这表明fat分区有待进一步优化资源,以提升并行计算性能。

3.4 多节点MPI并行

根据上述实验可知,采用单节点多线程并行计算对于提升数据处理效率比较有限,主要原因在于CPU的资源较少。如能够采用多个计算节点,则有望更大地提高全球电离层建模效率,对于电离层模型的重新再处理与分析有着重要的作用。采用MPI并行技术方案将全球电离层模型解算任务分别提交到不同数量的节点进行联合数据处理,且各节点也采用OpenMP多线程并行计算,总体耗时及各节点平均耗时如图4及表3所示。

由图4及表3可知,采用多个节点的分布式并行计算比仅使用单节点的数据处理效率有了显

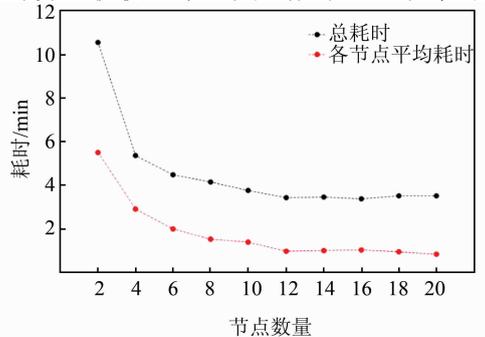


图4 不同节点数量时MPI并行计算总耗时和各节点平均耗时

Fig. 4 Total Time Consumption and Average Time Consumption of Nodes by Using MPI Parallel Computing with Different Number of Nodes

表 3 不同节点数量时建模的数据处理耗时
Tab. 3 Time Consumption of the Modeling with
Different Number of Nodes

节点数	总耗时/min	平均耗时/min
2	10.54	5.48
4	5.34	2.87
6	4.47	1.96
8	4.12	1.51
10	3.75	1.36
12	3.42	0.96
14	3.43	0.99
16	3.34	1.01
18	3.48	0.93
20	3.50	0.80

著提升,随着参与计算任务节点数的增加,数据处理总耗时和各节点平均耗时均呈比例下降。采用多节点 MPI 并行计算效率(耗时约 3.5 min)比单节点串行计算(耗时约 2 h)提高了 30 多倍,比单节点并行计算也提高了 3~4 倍。当节点数大于 12 个后,数据处理效率并没有显著提升,主要原因有:①节点增加到一定数量后,每个节点分配的任务量已不再减少,计算量保持一致;②不论参与计算的节点数有多少,串行计算部分占用了大约 2 min,使得总耗时不再进一步减少。若进一步提高效率,则需要尽可能将串行计算部分改为并行计算。

3.5 讨论

上述实验表明,利用超级计算机采用 MPI 并行计算,可充分利用丰富的计算资源,极大地提高数据处理效率。为了提高计算效能,应均衡划分计算任务,从而减少因个别节点任务过载而出现等待的情况,尽可能让各节点的任务以及每个线程的计算任务量均衡负载。对总任务进行分析,计算出效率最高时所需的节点资源,避免造成浪费,节省的资源可供其他用户使用。同时,还应根据计算任务的特点来确定提交任务到合适的分区节点,如全球电离层模型的再处理(十几年的观测数据)任务应采取单节点 OpenMP 并行计算方案,将历年以单天解为单元任务分配到多个节点上各自独立地进行数据处理;如果仅对算法进行测试,需要快速获得解算结果等小型计算任务,可采用 MPI 多节点分布式并行计算方案。此外,应尽可能将多任务通过循环方式实现而减少提交任务的次数,以免造成超算管理系统负载过多而假死的情况,影响其他用户的正常使用。

4 结语

随着多系统多频 GNSS 的发展,日益丰富的

观测数据让全球电离层建模面临如何大幅提高解算效率的问题。并行计算是解决此类问题的一种有效途径。本文采用武汉大学超级计算机中 3 个典型计算分区对 OpenMP 以及 MPI 并行计算在全球电离层建模的应用进行了详细实验与分析。实验结果表明,采用单节点 OpenMP 多线程并行计算可显著提高全球电离层建模效率,效率相比单线程提高近 10 倍;采用多节点 MPI 并行计算,充分利用了丰富的计算资源,使得计算效率进一步提升,效率相比单节点串行提高约 30 倍,相比单节点并行提高约 3~4 倍。在使用并行计算方案时,应尽可能让每个线程的任务均衡负载,同时让计算过程最大程度地并行化以实现更高性能计算。本文中实验内容与讨论对电离层建模算法的快速测试以及历年产品的重新再处理与分析等具有重要作用,对多系统 GNSS 快速精密定轨、大规模 GNSS 网解等也有较好的参考价值。

致谢:本文的数值计算得到了武汉大学超级计算机中心的计算支持和帮助。特别感谢武汉大学信息中心洪正国老师、测绘学院黄曦老师对笔者在超算使用和并行编程方面的帮助。

参 考 文 献

- [1] Li Zhenghang, Zhang Xiaohong. New Techniques and Precise Data Processing Methods of Satellite Navigation and Positioning [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009(李征航,张小红. 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法[M]. 武汉:武汉大学出版社,2009)
- [2] Hernández-Pajares M, Juan J M, Sanz J, et al. The IGS VTEC Maps: A Reliable Source of Ionospheric Information Since 1998 [J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3-4):263-275
- [3] Roma-Dollase D, Hernández-Pajares M, Krankowski A, et al. Consistency of Seven Different GNSS Global Ionospheric Mapping Techniques During One Solar Cycle [J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 11 (4): 1 394-1 432
- [4] Zou Xiancai, Li Jiancheng, Wang Haihong, et al. Application of Parallel Computing with OpenMP in Data Processing for Satellite Gravity [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(6):636-641 (邹贤才,李建成,汪海洪,等. OpenMP 并行计算在卫星重力数据处理中的应用[J]. 测绘学报, 2010, 39(6):636-641)
- [5] Wang Changshuai, The Research on Parallel Algorithm of Satellite Cloud Motion Winds [D]. Jinlin: Jinlin University, 2016 (王昌帅. 并行卫星云导风

- 算法研究[D]. 吉林:吉林大学,2016)
- [6] Chen Qiuji, Shen Yunzhong, Zhang Xingfu. Analysis of Efficiency of Applying MKL and OpenMP Polynuclear Parallel Algorithms to Recovery of High Degree Earth's Gravity Field[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(5):118-123 (陈秋杰, 沈云中, 张兴福. MKL 和 OpenMP 多核并行算法解算高阶地球重力场的效率分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2012, 32(5):118-123)
- [7] Wang Cheng, Shi Chuang, Zhang Hongping. Multithreaded Parallel Estimation for Global Ionospheric Model by Using OpenMP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(6): 813-819 (王成, 施闯, 章红平. 全球电离层模型的 OpenMP 多线程并行解算[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2018, 43(6): 813-819)
- [8] Wang Cheng, Mao Dazhi, Shi Chuang, et al. Distributed Parallel Estimation for Global Ionospheric Modeling[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(8): 1 207-1 213 (王成, 毛大智, 施闯, 等. 全球电离层模型的分布式并行解算[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2018, 43(8): 1 207-1 213)
- [9] Schaer S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System [J]. *Geod Geophys*, 1999, 59:59
- [10] Wang Cheng, Wang Jiexian, Duan Bingbing. Global Ionospheric Model with International Reference Ionosphere Constraint[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(11): 1 340-1 346 (王成, 王解先, 段兵兵. 附有国际参考电离层约束的全球电离层模型[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2014, 39(11): 1 340-1 346)

Rapid Parallel Estimation of Global Ionospheric Model Based on Supercomputer

SHI Chuang^{1,2} WANG Cheng^{3,2} ZHANG Tao¹

1 School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China

2 Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

3 Institute of Innovative Research in Frontier Science and Technology, Beihang University, Beijing 100083, China

Abstract: An Algorithm of global ionospheric rapid modeling based on OpenMP and MPI (message passing interface) parallel computing is developed to meet the requirement of high performance computing for the massive data and reprocessing. The supercomputer of Wuhan University is used for modeling the global ionosphere with kinds of parallel computing approaches. The results indicate that it can significantly improve the efficiency of data processing by applying multi nodes with MPI parallel computing technology. Compared to traditional single node with serial computing and parallel computing, the efficiency has increased by 30 times and 3 to 4 times, respectively. The MPI parallel computing approach takes full advantage of rich computing resources to promote the efficiency of global ionospheric modeling. It is very useful for rapid test of algorithms and reprocessing of modeling. Also, it has reference significance to precise orbit determination of multi GNSS (Global Navigation Satellite System) as well as huge GNSS network solutions.

Key words: global ionospheric model; supercomputer; parallel computing; multi threads

First author: SHI Chuang, PhD, professor, National Distinguished Young Scholar, Distinguished Professor of Changjiang Scholars Program of China, specializes in space geodesy and GNSS positioning and navigation. E-mail: shi@whu.edu.cn

Corresponding author: WANG Cheng, PhD. E-mail: acex@foxmail.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41804026; the National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFB0501802.