

异地高速互联环境下的海气耦合模式应用

韩琦琦, 刘鑫

引用本文

韩琦琦, 刘鑫. 异地高速互联环境下的海气耦合模式应用[J]. 计算机科学, 2023, 50(11A): 221000136-5.

HAN Qiqi, LIU Xin. Application of Air-Sea Coupled Mode in High-speed Interconnection Environment [J]. Computer Science, 2023, 50(11A): 221000136-5.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于改进模糊综合评价法的电力监控系统网络可靠性分析](#)

Network Reliability Analysis of Power Monitoring System Based on Improved Fuzzy Comprehensive Evaluation Method

计算机科学, 2023, 50(6A): 220400293-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220400293>

[基于M2M相遇区的PDR室内定位方法](#)

PDR Indoor Positioning Method Based on M2M Encounter Region

计算机科学, 2022, 49(9): 283-287. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210800270>

[一种基于AAE的协同多播主动缓存方案](#)

Collaborative Multicast Proactive Caching Scheme Based on AAE

计算机科学, 2022, 49(9): 260-267. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210800019>

[面向国产异构众核架构的CFD非结构网格计算并行优化方法](#)

Parallel Optimization Method of Unstructured-grid Computing in CFD for Domestic Heterogeneous Many-core Architecture

计算机科学, 2022, 49(6): 99-107. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210400157>

[基于国产众核处理器的深度神经网络算子加速库优化](#)

Deep Neural Network Operator Acceleration Library Optimization Based on Domestic Many-core Processor

计算机科学, 2022, 49(5): 355-362. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210500226>

异地高速互联环境下的海气耦合模式应用

韩琦琦 刘鑫

齐鲁工业大学(山东省科学院)山东省计算中心(国家超级计算济南中心)算力互联网与信息安全教育重点实验室
济南 250014

山东省计算机网络重点实验室山东省基础科学研究中心(计算机科学) 济南 250014

(hanqq@sdas.org)

摘要 随着超级计算机的发展,大规模数值计算、大数据分析对算力基础设施的能力和数量的要求日益增长,受成本与功耗等因素的制约,单个超算中心不能无限制扩大规模,异地超算互联互通为解决这个问题提供了一种新的思路。文中基于济南至青岛 10Gbps DWDM 光纤网络,搭建了济青跨地域 500km 高速互联的计算集群,实现了两地计算资源的统一调度,利用海气耦合模式 COAWST 中的海洋分量模式 ROMS 和大气分量模式 WRF 进行了多组同地和异地不同资源规模和配置的对比实验。实验结果表明,耦合模式在异地高速互联环境下协同计算是可行的,WRF 模式和 ROMS 模式在济南同地和济青异地运行同一算例的模拟结果相同,WRF 模式在济南集群运行、ROMS 模式在青岛集群运行时,运行时间比二者都在济南集群运行时增加 5%,单分量模式拆分在济南集群和青岛集群协同计算时通信耗时较长,异地高速互联环境更适合有分量模块的耦合模式。

关键词: 高速网络;超算互联;海气耦合;COAWST 模式;分布式计算

中图法分类号 TP399

Application of Air-Sea Coupled Mode in High-speed Interconnection Environment

HAN Qiqi and LIU Xin

Key Laboratory of Computing Power Network and Information Security, Ministry of Education, Shandong Computer Science Center(National Supercomputer Center in Jinan), Qilu University of Technology(Shandong Academy of Sciences), Jinan 250014, China

Shandong Provincial Key Laboratory of Computer Networks, Shandong Fundamental Research Center for Computer Science, Jinan 250014, China

Abstract With the development of supercomputers, large-scale numerical computing and big data analysis require increasing demand for high-performance computing capacities. Limited by cost and power consumption, a single supercomputing center cannot expand indefinitely. Interconnection of supercomputers in different places is a good solution. Based on the 10Gbps DWDM fiber optic network from Jinan to Qingdao, a long distance geographically interconnected computing cluster that consisted of the nodes located at Jinan cluster and some nodes at Qingdao cluster is built, which realizes the unified scheduling of computing resources in the two clusters. The ROMS model and WRF model in air-sea coupled model COAWS Tare used to conduct multiple sets of comparative experiments with nodes of varying sizes and locations. Experiments results show that it is feasible to perform coupled numerical simulation on long distance geographically interconnected computing cluster without substantial drop in performance. Simulation results of WRF and ROMS running the same example in Jinan cluster and Jinan-Qingdao cluster are the same. When WRF runs in Jinan cluster and ROMS runs in Qingdao cluster, the running time is 5% more than that when WRF and ROMS both run in Jinan cluster. When WRF and ROMS are split in Jinan-Qingdao cluster, the communication takes up a lot of time. The high-speed interconnection environment is more suitable for coupled model that have low communication requirements.

Keywords High-speed networks, Supercomputing interconnection, Air-Sea coupled, COAWST mode, Distributed computing

1 引言

近年来,算力成为数字时代的核心生成力,大规模科学与工程计算和智能应用对超大算力的规模和性能提出了更高要求^[1]。超算中心是公共服务平台,随着用户的增加,单个超算中心的大部分计算资源都已被占有,无法满足多个项目的计算需求。受成本与功耗等因素的制约,任何一个超算中心或

者研究机构均不能无限制地扩大超级计算机的规模,此时就迫切需要互联多个超算中心的空闲资源组成一个更大的异地算力池来计算。但各地超算基础设施复杂异构、空间分散,异地计算存在延迟等问题,这给应用适配和算力协同服务提出了巨大挑战。超算互联网是一种以超级计算机和高速互联网为基础的先进计算基础设施,通过高速互联技术和专用网络将分布在各地的超级计算机互联互通^[2],聚合多个超级计算机的

基金项目:山东省重点研发计划(2022CXGC020106);自然资源部海洋环境科学与数值模拟重点实验室开放基金(2021-YB-02);齐鲁工业大学科教产融合试点工程重大创新专项(2022JBZ01-01)

This work was supported by the Key Research and Development Program of Shandong Province(2022CXGC020106), Open Foundation of Key Laboratory of Marine Science and Numerical Simulation, Ministry of Natural Resources(2021-YB-02) and Major Innovation Projects of Science and Education Integration Pilot Project of Qilu University of Technology(2022JBZ01-01).

通信作者:刘鑫(liuxin@sdas.org)

软硬件资源实现算力互补,能有效解决算力碎片化和资源利用不均衡的问题。

国家超级计算济南中心(简称“济南超算”)联合崂山实验室建立了连接济南和青岛的超算互联网试验网,实现了跨地域 500 km 传输距离、10 Gbps 传输带宽和不超过 6 ms 的超低延迟,这与传统互联网相比性能大幅度提升。海洋数值模拟作为高性能计算的典型传统应用,正逐步朝着更高分辨率的方向发展,分辨率的提高会导致计算量呈几何级数增长,对计算机资源的需求也随之急剧增加。一般来说,水平分辨率每提升 1 倍,计算量会增大到原来的 8~10 倍^[3],高分辨率的模拟对高性能计算的需求非常迫切。海气耦合模式 COAWST 是常见的耦合气候模式^[4],采用模块化耦合框架,各分量模式有着各自独立的物理意义和计算特征,由耦合器管理各分量模式间的数据交互。耦合器属于网间进程通信的耦合方式,耦合模式可以在多台机器上并行^[5],因此耦合模式相对于单一模式来说,更适用于大规模分布式的科学计算,所以本文选取海气耦合模式 COAWST 在济青高速互联环境下开展实验。本文的工作将为超算互联网的发展和跨区域算力调度提供参考,为“东数西算”工程提供技术验证和应用示范,促进算力应用服务协同发展,助力全国一体化算力网络优化布局。

本文基于济南-青岛超算互联网试验网,研究海气耦合模式在异地高速互联环境下协同计算的可行性和效率。本文第 2 章研究了硬件系统和网络组件的设置,在济南超算和崂山实验室超算搭建了跨地域 500 km 高速互联的计算集群;第 3 章利用海气耦合模式 COAWST 的实验算例,设计了实验方案;第 4 章分析了实验结果,验证了海气耦合模式在异地高速互联环境下协同计算是可行的;最后总结全文并展望未来。

2 异地高速互联环境

进程级耦合计算需要统一的作业调度系统,济南超算与崂山实验室超算的作业调度系统、计算节点的操作系统和网络都不相同,为了保障济南超算和崂山实验室超算的业务正常运行,本文在济南超算机房和崂山实验室超算机房搭建了中小型计算集群。

2.1 异地高速互联集群架构

本文基于济南超算至崂山实验室的 10 Gbps DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) 光纤网络,采用 Obsidian Strategics 的 Longbow E100 长距离传输设备实现了 InfiniBand 网络的长距无损通信^[6-7],E100 设备具有范围扩展、路由和加密功能,允许 InfiniBand 通过光纤在全球范围内安全地扩展。在济南超算和崂山实验室超算机房均配置一台支持 40 Gbps 的光纤交换机 E100,将两台 E100 设备的 WAN (Wide Area Network) 端口分别接入 10 Gbps DWDM 光纤网络,IB 输出端口分别接入济南青岛两地的 IB 交换机上,实现了 IB 协议的远程信号扩展,使得两台 IB 交换机能够在济南和青岛两地进行 IB 协议的数据交换^[8],如图 1 所示。经过测试,济南集群到青岛集群的 IPoIB(Internet Protocol over InfiniBand)延迟约为 5.8 ms,为济南本地延迟的 39 倍,IB 读延迟约为 5 632 us,约为济南本地延迟的 1 750 倍,IB 带宽约为 984 MB/s。

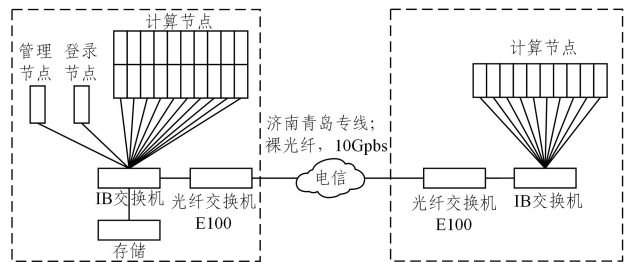


图 1 济南(左)青岛(右)集群互联架构

Fig. 1 Architecture for interconnection between Jinan cluster(left) and Qingdao cluster(right)

2.2 硬件系统

济南集群和青岛集群的硬件系统主要由登录节点、计算节点、存储系统及管理节点组成,节点间通过 InfiniBand 网络互连^[9]。

1) 登录节点

登录节点是访问集群系统的网关,在济南集群配置一台登录节点,实现用户登录、作业编译和通过作业调度系统提交作业等功能。

2) 计算节点

计算节点是作业运行的载体,济南集群配置 20 台计算节点,青岛集群配置 10 台计算节点,单节点采用两颗 Intel Xeon X5675 CPU,每颗 CPU 6 核心,主频 3.07 GHz,300G SATA 硬盘,64GB 内存。最大可支持 $30 \times 12 = 360$ 核作业的两地协同计算。

3) 存储系统

存储系统用于提供集群的全局数据存储,济南集群部署一套 RAID(Redundant Array of Independent Disks)磁盘阵列,采用 NFS(Network File System)网络文件系统进行管理,可在线提供 15TB 存储容量。济南集群的登录节点、管理节点和所有计算节点通过本地 40 Gbps InfiniBand 网络挂载到存储系统,实现全局文件系统共享;青岛集群的所有计算节点则通过扩展高速 InfiniBand 网络实现存储系统异地挂载,从而实现济青两地全局文件系统共享。

4) 管理节点

济南集群配置一台管理节点,在其上部署资源管理服务,负责管理调度济南青岛两地集群,在青岛集群配一台备用管理节点。济南集群和青岛集群的所有计算节点均部署资源服务客户端,通过资源管理服务器可以实时查询济南青岛两地集群的计算节点和作业的状态,将作业快速可靠地提交到两地集群的计算节点上进行计算^[10]。

5) 网络配置

济南集群和青岛集群由 10 Gbps 的光纤网络连接,分为管理网络和业务网络两条链路。管理网络负责管理两地集群,由千兆以太网连接济南集群的管理节点和青岛集群的 IPMI 管理接口,业务网络通过 InfiniBand 网络连接两地集群的计算节点和存储节点^[11]。同地计算节点间带宽为 40 Gb/s,异地计算节点通过 IB 协议的远程信号扩展技术实现带宽为 10 Gb/s 的远距离 IB 协议通信。

2.3 软件系统

济南集群和青岛集群的软件系统主要由节点操作系统、集群管理系统、作业调度系统、并行开发工具链(编译器、数学

库等)和应用软件等组成^[12]。本文济南集群和青岛集群的登录节点、管理节点和计算节点均安装 Linux 操作系统,采用 PBS Pro 作业调度系统管理两地计算集群,支持命令行及 WEB 方式实现作业的提交、查看和删除等操作,底层软件库环境安装 Intel 和 GNU 等 C/C++/Fortran 编译器、Intel MKL 数学核心库等数学库、Intel MPI 和 Open MPI 等 MPI 库,支持 MPI 并行程序,满足大部分科学计算的需要,具体的软件系统环境如表 1 所列。

表 1 软件系统环境

Table 1 Software system environment

名称	值
作业调度系统	PBS Pro 19.1
MPI 库	IntelMPI, OpenMPI
数学库	BLAS, FFTW, LAPACK, HDF5, NETCDF3/4
编译器	Intel C/C++ Fortran 77/90/95 GNU C/C++ Fortran 77/90/95
操作系统	Linux Red Hat 4.8.5-44

2.4 资源划分

根据计算节点的地理位置划分了多种队列,如表 2 所列。all_nodes 队列包含济南集群和青岛集群的全部计算节点,用于测试两地协同计算;all_nodes_jn 队列包含济南集群的全部计算节点,用于测试济南集群同地运行作业;all_nodes_qd 队列包含青岛集群的全部计算节点,用于测试青岛集群同地运行作业。

表 2 队列信息

Table 2 Queue information

队列名	简介	节点数/个
all_nodes	全部计算节点	30
all_nodes_jn	济南集群的全部计算节点	20
all_nodes_qd	青岛集群的全部计算节点	10

3 实验设计

3.1 模式与数据

本文实验中海气耦合模式 COAWST 的大气分量模式采用 WRF(Weather Research and Forecasting)3.7.1 版本,海洋分量模式采用 ROMS(Regional Ocean Model System)838 版本^[13-14]。选取 COAWST 官网提供的 JOE_TC 算例进行实验,模拟热带气旋向西移动时的海气相互作用过程,模拟区域为 25.63°W~48.37°W, 11.83°N~27.76°N,网格数设置为 199*149*21,模拟时间为 2005 年 09 月 01 日 00 时-03 日 00 时,共 48 h,大气分量模式和海洋分量模式通过耦合器 MCT(Model Coupling Toolkit)进行数据交换的时间间隔为 600 s^[15],WRF 模式的输出频率为每小时一次,ROMS 模式的输出频率为每 6 小时一次,初始场和边界场均采用 COAWST 官网提供的运行数据。

3.2 实验设计

为了测试海气耦合模式在高速互联环境下异地协同计算的可行性和效率,本文在控制算例设置不变的情况下,针对大气分量模式 WRF 和海洋分量模式 ROMS,设计了多组同地和异地不同资源规模的对比实验^[16]。

实验 1 分量模式间同地运行

将 WRF 和 ROMS 均在济南集群运行的结果作为参考,WRF 和 ROMS 分别采用 6 核、18 核、30 核、42 核和 54 核在

济南集群进行了实验,如表 3 所列。其中 W 代表大气分量模式 WRF,R 代表海洋分量模式 ROMS,jn 代表分量模式运行于济南集群,qd 代表分量模式运行于青岛集群,数字代表各分量模式使用的 CPU 核数。

表 3 实验 1 中 WRF 和 ROMS 的资源配置情况

Table 3 Processor configuration of WRF and ROMS in experiment 1

序号	实验方案
1	W6jn_R6jn
2	W18jn_R18jn
3	W30jn_R30jn
4	W42jn_R42jn
5	W54jn_R54jn

实验 2 分量模式间异地运行

在控制 WRF 和 ROMS 使用的资源数大小与实验 1 中一致的情况下,保持单分量模式在同地运行,将 WRF 和 ROMS 分配到济南集群和青岛集群协同运行。首先将 WRF 运行于济南集群、ROMS 运行于青岛集群,然后将 WRF 运行于青岛集群、ROMS 运行于济南集群进行对比实验,如表 4 所列。

表 4 实验 2 中 WRF 和 ROMS 的资源配置情况

Table 4 Processor configuration of WRF and ROMS in experiment 2

序号	实验方案
1	W6jn_R6qd
2	W6qd_R6jn
3	W18jn_R18qd
4	W18qd_R18jn
5	W30jn_R30qd
6	W30qd_R30jn
7	W42jn_R42qd
8	W42qd_R42jn
9	W54jn_R54qd
10	W54qd_R54jn

实验 3 分量模式内异地运行

以 WRF 和 ROMS 均为 54 核运行为准,将单个分量模式拆分在济南集群和青岛集群协同计算。实验方案如表 5 所列,序号 1 中将 WRF 拆分为采用 27 核在济南集群、27 核在青岛集群运行,ROMS 采用 54 核在青岛集群运行;序号 2 中将 ROMS 拆分为采用 27 核在济南集群、27 核在青岛集群运行,WRF 采用 54 核在青岛集群运行;序号 3 中将 WRF 和 ROMS 均拆分为 27 核在济南集群、27 核在青岛集群运行。

表 5 实验 3 中 WRF 和 ROMS 的资源配置情况

Table 5 Processor configuration of WRF and ROMS in experiment 3

序号	实验方案
1	W27jn27qd_R54qd
2	W54qd_R27qd27jn
3	W27jn27qd_R27jn27qd

4 实验结果与分析

4.1 结果一致性验证

为验证 WRF 模式和 ROMS 模式以完全相同算例配置在济南同地运行和济青异地协同运行结果的一致性,海洋分量选取海表面温度 SST(Sea Surface Temperature),大气分量选取 10m 风场 U10、V10 的结果进行对比。图 2(a)和图 2(b)分别为 WRF 和 ROMS 在济南同地运行和济青异地运行计算得到的第 12 小时(2005 年 9 月 1 日 12 时)、30 小时(2005 年 9 月 2 日 06 时)以及 48 小时(2005 年 9 月 3 日 00 时)的海表面温度和 10m 风场。

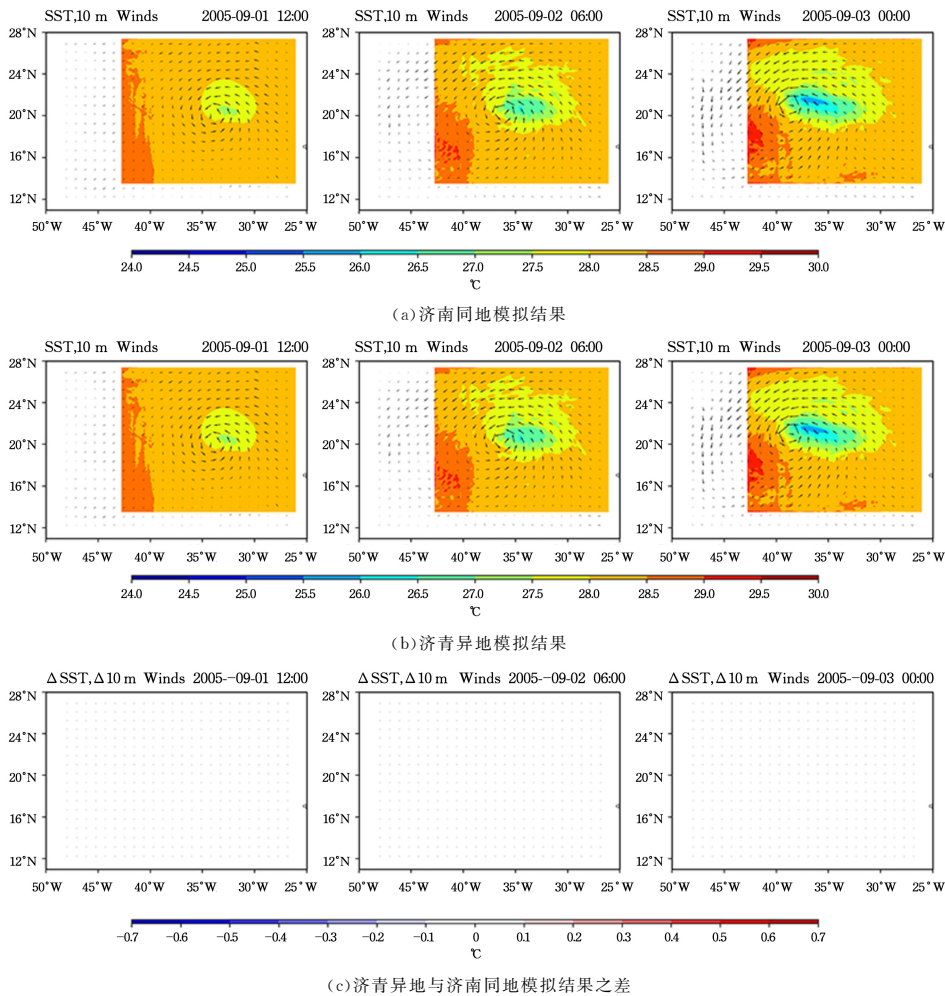


图2 9月1日12时、9月2日06时和9月3日00时海表面温度(填色)叠加10m风场(矢量)

Fig. 2 SST(colored)and 10m wind field(vector) at 12:00 on September 1,06:00 on September 2 and 00:00 on September 3

分别将济青异地与济南同地计算所得的 SST, U10 和 V10 变量做差,来计算空间场下 3 个变量的差值,其结果如图 2(c)所示,可以看出海洋分量和大气分量在 1 日 12 时、2 日 06 时以及 3 日 00 时模拟结果差异均为 0。说明 WRF 模式和 ROMS 模式在济南同地和济青异地运行相同算例的计算结果相同,海气耦合模式在济青高速互联环境下协同计算结果是可靠的。

4.2 济南同地和济青异地运行时间分析

实验 1 在济南同地和实验 2 在济青异地协同运行的总运行时间如图 3 所示。蓝色柱表示 WRF 和 ROMS 均在济南集群运行的总时间,橘色柱表示 WRF 在济南集群 ROMS 在青岛集群运行的总时间,绿色柱表示 WRF 在青岛集群 ROMS 在济南集群运行的总时间。

由图 3 可以看出,当 WRF 和 ROMS 使用相同核数在济南集群运行时,模式总运行时间最短;当 WRF 在济南集群、ROMS 在青岛集群运行时,模式总运行时间较济南同地运行时间差异较小,仅增加 5%左右;当 WRF 在青岛集群、ROMS 在济南集群运行时,模式总运行时间较济南同地运行时间增加 20%左右。本文实验环境中,全局文件系统部署在济南集群上,青岛集群的计算节点需要通过 InfiniBand 网络从济南端存储系统下载和存储数据,在算例设置中 WRF 模式比 ROMS 模式输出频率高,且 WRF 模式的输出文件更大,所以

当 WRF 模式在青岛集群运行时,通过 InfiniBand 网络向济南端存储数据耗时更长,因此本文实验中 WRF 运行于济南集群、ROMS 运行于青岛集群能加快模式的整体运行速度。

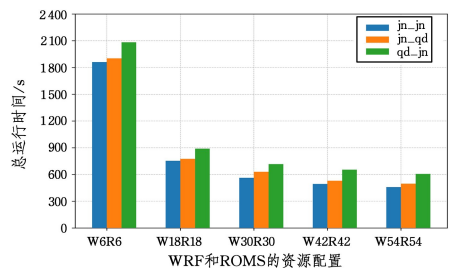


图3 济南同地和济青异地的总运行时间对比(电子版为彩图)

Fig. 3 Comparison of running time between Jinan cluster and Jinan-Qingdao cluster

4.3 单分量模式异地运行时间分析

图 4 给出了 WRF 模式和 ROMS 模式均采用 54 核在济南同地和拆分在济青异地运行的总运行时间对比图。

当 WRF 模式或 ROMS 模式拆分到济青两地集群协同运行时,模式总运行时间约为 4 000~5 000 s;当 WRF 模式和 ROMS 模式均拆分到济青两地集群协同运行时,模式总运行时间最长,约为济南同地运行时间的 10 倍。实验结果表明,单分量模式也可以实现两地进程级协同运行,但单分量模式拆分在济南集群和青岛集群协同计算时通信耗时过长,因此

在异地互联网络环境有较大的提升之前还是建议将单个分量模式放在同地计算,异地互联环境更适合有分量模块的耦合模式。

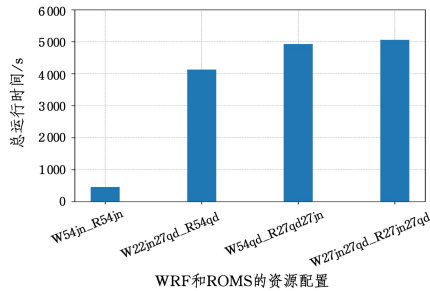


图4 分量模式拆分和不拆分运行的总时间对比

Fig. 4 Comparison of running time for single model split and unsplit

结束语 基于济南超算至崂山实验室的 10Gbps 光纤网络,本文搭建了济青两地高速互联的计算集群环境,采用海气耦合模式 COAWST 进行了海洋分量模式 ROMS 和大气分量模式 WRF 在济南同地和济青异地不同资源规模和配置的对比实验。结果表明,海气耦合模式在异地高速互联环境下协同计算是可行的。WRF 模式和 ROMS 模式在济南集群和青岛集群协同计算的结果是可靠的;当 WRF 模式在济南集群、ROMS 模式在青岛集群运行时,模式总运行时间比都在济南集群运行时增加 5%;单分量模式也可以进行异地进程级协同计算,但单分量模式拆分在济南集群和青岛集群协同计算时通信耗时较长,因此异地互联环境更适合有分量模块的耦合模式。

要建好、用好超算互联网,实现各地超级计算机的互联互通,需要进一步考虑作业调度系统和文件系统融合,实现算力、网络、存储、数据等各种资源的协同调度,需要开展多个典型场景下的应用示范,进一步进行应用探索。

参考文献

[1] ZHANG Y Q. State-of-the-art Analysis and Perspectives of 2018 China HPC Development [J]. Computer Science, 2019, 46(1):1-5.

[2] CHRZESZCZYK J, HOWARD A, CHRZESZCZYK A, et al. InfiniCloud 2.0: Distributing High Performance Computing across Continents [J]. Supercomputing Frontiers and Innovations, 2016, 3(2):54-71.

[3] LI M K, ZHANG S Q, WU L X, et al. A high-resolution Asia-Pacific regional coupled prediction system with dynamically downscaling coupled data assimilation [J]. Science Bulletin, 2020, 65(21):1849-1858.

[4] CHEN Z Q, GAN Q Y, XU J J. Numerical simulation of severe tropical storm Fani(2019) in the northern Indian Ocean using the COAWST model [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2022, 38(3):366-376.

[5] LIU W, YANG C Y, LI Y D, et al. The development and application of the WRF-POM regional air-sea coupled model based on the MCT coupler[J]. Marine Sciences, 2018, 42(5):98-107.

[6] NIEDZIELEWSKI K, SEMENIUK M, JAROS L, et al. Long Distance Geographically Distributed InfiniBand Based Computing[J]. Supercomputing Frontiers and Innovations, 2020, 7(2): 24-34.

[7] KIM B, JUNG J, MIN H, et al. Efficient Data Pre-fetching Scheme for InfiniBand based High Performance Clusters[J]. KIISE Transactions on Computing Practices, 2017, 23(5): 293-298.

[8] WANG X, LIN F, QIAN D P, et al. A large-scale Infiniband interconnection network simulation system based on OMNet++ [J]. Computer Engineering & Science, 2021, 43(5):792-798.

[9] FU H H, LIAO J F, YANG J Z, et al. The Sunway Taihu Light supercomputer: system and applications [J]. Science China (Information Sciences), 2016, 59(7):113-128.

[10] WANG X N, XIAO H L, CAO R Q. Design and implementation of an optimal job scheduling model in the high performance computing environment [J]. Computer Engineering & Science, 2017, 39(4):619-626.

[11] LIU P N, GUITART J. Performance characterization of containerization for HPC workloads on InfiniBand clusters: an empirical study [J]. Cluster Computing, 2022, 25(6):847-868.

[12] GAO J G, ZHENG F, QI F B, et al. Sunway supercomputer architecture towards exascale computing: analysis and practice [J]. Science China (Information Sciences), 2021, 64(4):177-197.

[13] WU Z H Y, JIANG C H B, DENG B, et al. Numerical investigation of Typhoon Kai-tak(1213) using a mesoscale coupled WRF-ROMS model [J]. Ocean Engineering, 2019, 175(3): 1-15.

[14] WU Z H Y, CHEN J, JIANG C H B, et al. Numerical investigation of Typhoon Kai-tak(1213) using a mesoscale coupled WRF-ROMS model—Part II: wave effects [J]. Ocean Engineering, 2020, 196(C):106805-106805.

[15] LIU X, HAN Q Q, CHEN X E. Numerical simulation of seasonal variation of the South China Sea throughflow [J]. Periodical of Ocean University of China, 2022, 52(1):12-21.

[16] YE Y J, CHEN D X, HU J K, et al. Parallel Design and Optimization of GRAPES_CUACE On-line Coupled Air Quality Mode [J]. Computer Science, 2019, 46(S2):528-534.



HAN Qiqi, born in 1989, postgraduate, engineer. Her main research interests include high performance computing and application and so on.



LIU Xin, born in 1981, Ph.D, associate researcher. Her main research interests include numerical simulation and high performance computing and application.