



Parallel Algorithm Optimization of Superviscosity Factor on Heterogeneous Multicore Processors

Hongbo Chen, Xuezhong Qian, Lin Gan, Jingheng Xu and Xu Liu

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

June 8, 2019

超粘度因子在异构众核处理器上的并行算法优化

陈宏博^{1,2+}, 钱雪忠¹, 甘霖^{2,3}, 徐敬蘅^{2,3}, 刘徐^{1,2}

1. 江南大学, 江苏省 无锡市 214122
 2. 国家超级计算无锡中心, 江苏省 无锡市 214131
 3. 清华大学, 北京市 100084
- + 通信作者 E-mail: q992024760@vip.qq.com

Parallel Algorithm Optimization of Superviscosity Factor on Heterogeneous Multicore Processors

CHEN Hongbo^{1,2+}, QIAN Xuezhong², GAN Lin^{2,3}, XU Jingheng^{2,3}, LIU Xu^{1,2}

1. Jiangnan university, wuxi, 214122, China
 2. National supercomputing center of wuxi, wuxi 214131, China
 3. Tsinghua university, Beijing 100084, China
- + Corresponding author: E-mail: q992024760@vip.qq.com

Abstract: As a widely used earth simulation system, CESM provides an indispensable quantitative basis for the study of earth system changes and the interaction of human activities. In reality, it relies on high performance computing devices such as supercomputers, but there is still a low degree of parallelism in the process of transplanting CESM to heterogeneous supercomputers. Therefore, in order to solve the problem that the finite difference algorithm in CESM has a large amount of redundancy when SW26010 heterogeneous many-core processor reads the memory, different optimization schemes are designed according to the functions of different data structures. As the core application of CESM in high performance computer, the parallel performance of the algorithm has been improved significantly.

Key words: Parallel Computation; CESM; Heterogeneous Multicore CPU; Finite Difference Algorithm; High Performance Computing

摘要 CESM 作为被广泛使用的地球模拟系统, 在地球系统变化与认识人类活动相互作用的研究上提供了不可缺少的定量依据。在现实中 CESM 依赖超级计算机等高性能计算设备, 但是在 CESM 向异构超级计算机的移植过程中仍存在并行度较低等问题。因此, 本文针对 CESM 超粘度因子计算中有限差分算法在申威 26010

异构众核处理器内存读取时存在大量冗余等问题,提出了根据多种数据结构函数设计数据重构、计算核心捆绑等多种并行优化方案,弥补了申威 26010 处理器在数据读取过程中缺少共享缓冲区的不足。经过改进后算法并行性能有显著提高。

关键词: 并行计算; CESM; 异构众核处理器; 有限差分算法; 高性能计算

1 引言

CESM(Community Earth System Model)是模拟过去、现在与未来的气候变化必不可缺的工具^[1]。一直都是超级计算机上的重要应用,同时也是最先进并且广泛使用的耦合系统模型之一。CESM 由 NCAR 开发并且维护,包含 50 万到 100 万行的代码量,在当前更高分辨率和更复杂的物理参数化的发展趋势下,计算能力的提升是当前 CESM 需要解决的主要问题之一^[2]。

自从地球系统数值模型程序在电子计算机上运行以来,大气研究也伴随着计算机科学与技术的发展而发展,成为了超级计算的主要用户之一。以强大的计算机为基础,针对不同的研究做出了诸多开创性的工作。

高粘度因子计算、模拟波动传导、浅水波方程计算作为 CESM 中重要部分,广泛运用到有限差分算法。有限差分是将方程式变量分布在等距离或者不等距离的经纬网格之上通过相邻网格来求解目标值,在 CESM 中依靠有限差分算法实现气候预测与系统模拟等应用。

近年来,伴随着异构众核加速器的异构性质逐步成为了高性能计算机系统的发展主流,我们见证了同构计算机向异构众核计算机的转变。越来越多

的超级计算机试图使用新的异构众核加速器来克服在气候建模上的困难。

CESM 早期的移植主要在同构超级计算机上。虽然在同构超级计算机上的移植已经有了不错的效果,但是同构计算机拥有计算性能低,且功耗大等缺点,已经逐步被异构处理器所取代。截止目前为止,排名前七名的超级计算机均为异构众核处理器。虽然异构众核超级计算机已经得到发展,但是仍然只有少数的几个系统模型能够在异构众核高性能计算机上移植,且并行度不高。例如,日本气象厅开发的新一代高分辨率大气模型 ASUCA,可扩展性非常强,最多可用于上千个节点。另一个例子是普林斯顿海洋模型在 GPU 上完全移植,在 4 个 GPU 上执行移植实现了相当于 408 个 CPU 的优化性能^[3,4]。本文着重实践“神威·太湖之光”超级计算机的应用性。在并行过程中针对主存与局部存储数据交换过程中导致从核阵列内容冗余过大的问题,且在计算上使用 SIMD(单指令多数据流)指令最终使得有限差分运算在申威 26010 异构众核处理器上的性能上有显著的提升。

本文针对申威 26010 异构众核处理器中因计算阵列中缺少共享缓存空间,在处理有限差分算法中产生较大冗余导致并行度不足的问题,提出了分块方法、计算核心捆绑法等并行策略,在 CESM 超粘度因子相关函数内取得了较好的并行性能。

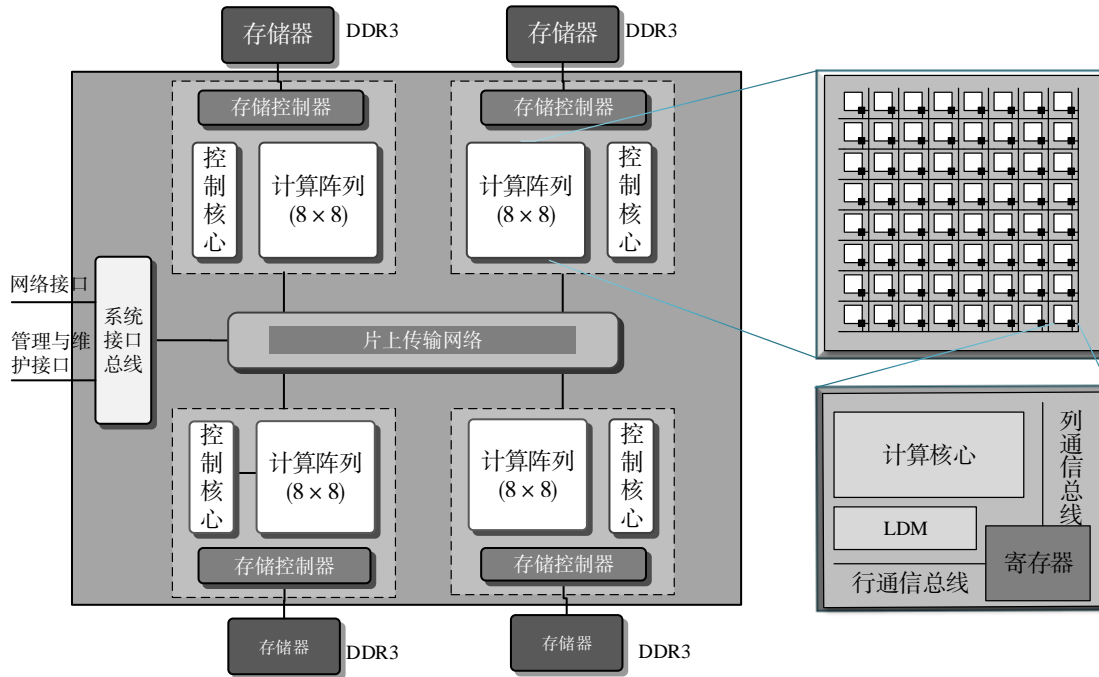


图1 申威 26010 异构众核处理器架构图

Fig.1 SW26010 many-core processor architecture diagram

2 硬件系统概述

2.1 “神威·太湖之光”超级计算机

“神威·太湖之光”超级计算机是世界上第一个峰值性能超过 100Pflops 的超级大规模并行处理计算机系统，采用高密度弹性超节点和高流量复合网格架构、面向多目标优化的高效能体系结构。在 2016 年 6 月 20 日的法兰克福世纪超算大会上“神威·太湖之光”超级计算机荣登榜首，与同时代排名第二的超级计算机快出近两倍，“神威·太湖之光”的性能功耗比为 6051MFlops/W，居世界第一^[5]。

计算机架构采用面向高性能计算的可扩展多态复合架构，高密度组装、高效率直流供电、全机水冷等关键技术、配备精确的资源调度管理，丰富的并行的编程语言和开发环境。全机采用申威 26010 异构众核处理器。

2.2 申威 26010 异构众核处理器

“神威·太湖之光”超级计算机共搭载 40960 个申威 26010 异构众核处理器，处理器采用片上计算阵列集群和分布式共享存储相结合的异构众核体系结构，使用 64 位自主申威系统指令。异构众核处理器集成了 4 个运算核组 (CG)，每个核组包含 1 一个运算控制核心 (MC) 与 64 个计算处理单元 (CPEs)。64 个运算核心、阵列控制器、一级指令 Cache (LDM) 构成 1 个运算核心阵列 (CPEs 集群为 8x8 网格)^[7]。运算控制核心和运算核心均可以访问芯片上的所有主存空间。处理器集成 4 路 128 位 DDR3 存储控制器、8 通道 PCIe3.0、千兆以太网接口如图 1 所示。

同时异构众核体系中提供了以下 4 种异构编程模型：1) 主从加速并行模型；2) 主从协同并行模式；3) 主从异步并行模式；4) 主从动态并行模式。不同的异构编程模型根据程序中的特性，可取得不

同加速效果。

2.3 系统工具介绍

申威 26010 处理器并行编程模型可以描述为 MPI+Sunway OpenACC 或 MPI+Sunway Athread, 大多情况下一个 CG 应对一个 MPI 进程, 对于 CG 中的控制核心和 64 个计算核心我们使用 Sunway OpenACC 或 Sunway Athread 进行众核并行加速。

Sunway OpenACC 编译工具支持 OpenACC 2.0 语法, 目标是共享内存上的从核集群, 不同的数据传输方式与申威 26010 特殊的体系结构特性对应, 且在原有的标准上进行了大量的语法扩充^[8,9]。

虽然 Sunway OpenACC 为程序一直为“神威·太湖之光”超级计算机提供了一个较好的并行的结构, 可以方便的将程序移植到“神威·太湖之光”超级计算机上。但是限制了许编程操作控制等与性能相关的编程接口, 限制了不支持许多与性能相关的向量化、DMA 操作控制等接口。相比之下 Sunway Athread 接口提供了可以充分利用的众核架构性能编程接口。

Sunway Athread 是专门为了申威 26010 异构众核处理器设计的轻量级线程库, 同时也是 OpenACC 的底层实现, Sunway Athread 允许控制多个不同的工作重叠。虽然 Sunway Athread 需要更多的编程操作, 但充分利用了神威体系结构的内部潜能。

2.4 DMA 通信

对于申威 26010 异构众核处理器中多个分量模式并行优化主要思路是减少 DMA 通信开销。程序众核化后计算开销会分配到各个计算核心之中。减少访存部分的开销最有效的办法是减少通信的次数且单次通信的数据长度^[10]。通常在计算量确定的情况下数据长度是确定的, 那么, 如何减少通信的次数、提高通信带宽的利用率成为减少通信开销最直的方法。

3 优化工作概述

本文着重优化 CESM 中超粘度因子的优化, 主要包含超粘度计算部分与应用计算部分。实际运用中许多现象伴随着时间而发生变化, 例如在 CESM 中处理气体扩散以及热传导等问题, 均需用有限差

分法解决这类问题, 从已知值中通过差分格式沿着时间增加的方向, 逐步求出近似解。实际上当计算时间足够大时就能到满足精度的近似解^[11], 即是对数值作出评估预测。

通过解决空间或时间区域边界上的边值条件来解决混合问题。有限差分方法是一种解决求常微分方程等问题的常用方法, 超粘度因子的计算与应用计算中有限差分方法来进行数值预测与模拟等问题。通过近似于有限差分计算板计算超粘度因子有限差分简计为:

$$f_0 = \omega_0 d_{(x \pm i, y)} / \sum_{i=1}^n (\omega_i d_{(x \pm i, y)} + d_{(x, y \pm i)})$$

当用热传导代替其初边界值问题时:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, (x, y) \in D$$

当 $t=0$ 时, $u = f(x, y), (x, y) \in D$, 即是靠邻域的值来求解下一时刻的数值。

有限差分模板计算, 是一种基于偏微分方程的数值离散方法, 在本次实验的两个函数中主要是根据周围的数值预测出目标点的数值, 该模板在超粘度因子计算中出现近似计算。

3.1 数据结构优化

本文在对超粘度因子计算过程中因计算需求不同, 将不同规模的数据存储问题简略分为以下三种不同的数据存储结构, 针对三种数据存储结构, 提出多种系统并行方案使硬件发挥最优计算性能。

类型一:

```
type elem_state_t
real          (kind=real_kind)          ::
dp3d(np,np,nlev,timelevels,nete)
end type elem_state_t
```

类型二:

```

type derived_state_t
  real      (kind=real_kind)  ::
dpdiss_biharmonic(np,np,nlev,nete)
  real      (kind=real_kind)  ::
dpdiss_ave(np,np,nlev,nete)
end type derived_state_t
    
```

类型三:

```

type element_t
  type (derived_state_t) :: derived
  type (elem_state_t)   :: state
end type element_t
    
```

超粘度计算函数中通过将数据重构的策略,实现数据存储连续,主存通信过程中减少通信次数,在实际通信过程中降低主存通信的代价,实现整体并行性的提高。

上述中类型一的存储结构,在小规模低分辨率时数据结构。为达到较好的并行效果,降低硬件占有率,我们进行了数据的重构一个核组分配到两个elem,从核中最小的计算单元为一个(np*np)数据。大部分数据通过 DMA 操作与控制实现主存与局部存储的通信即可发挥硬件的最优性能。

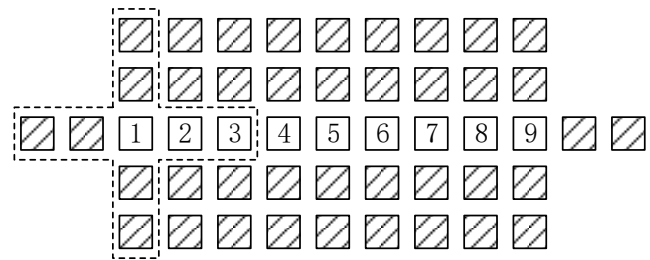
类型二的数据结构。即存在全局共享相同的元素时,单纯使用 DMA 操作进行通信一个从核阵列需要从主存读取 64 次相同的数据,需要提交 64 次相同的作业。根据在申威 26010 中寄存器之间存在高效的行通信或列通信的优势,采取 Bcast 广播的方式。广播过程中为了避免多跳通信降低寄存器通信的效率,本文设计了如下的广播方式,使特定列号的计算核心通过 Sunway Athread 工具中的 Bcast 进行数据广播,剩下相应列号的计算核心只需要寄存器中接收数据即可。这是优化方案利用寄存器通信高带宽的优势有效的提升了并行的性能。

类型三为在大规模情况下分辨率精度提高,更

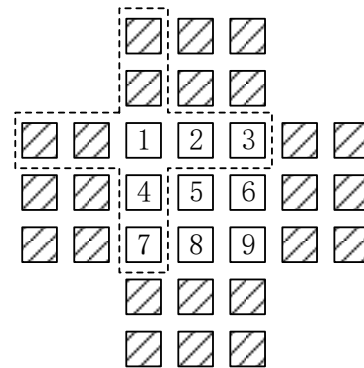
高的分辨率需要消耗更多的计算能力、存储能力以及通信能力。在该结构下内存访问方案改变,从核计算阵列可计算的单元数减少,未解决分辨率提高后数据读取量变大,本文设计一种全新计算核心捆绑方案,具体参考章节 3.3。

3.2 分块方法

本节描述分块方法,分块方法是减少 LDM 数据冗余提高并行性的转换技术之一。在二维空间上以分块结构将数据从主存传入计算阵列可有效减少冗余比,如图 2 所示。



(a) continuous method



(b) tiling method

图 2 分块方法

Fig.2 tiling of stencil

比较上图,在计算相等数据量的过程中使用分块方法可提高计算核心 LDM 空间利用率,同时提升整体计算性能。

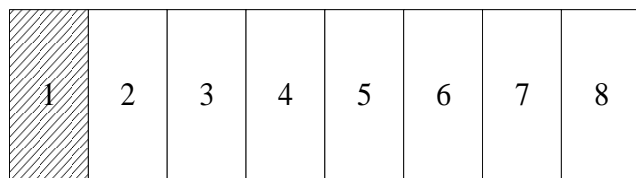
3.3 计算核心捆绑法

在章节 3.2 中提到了分块方法,该方法虽然有效减少了冗余提高了 LDM 空间利用率,但是牺牲了数据的连续性。为取得良好的扩展性单纯的分块方法

是不可取的。通过计算阵列捆绑方案可弥补了分块方法中数据不连续的缺点，对于相邻计算核心之间的通信我们重新设计了边界交换部分。我们应用了申威 26010 体系结构计算核心之间低延迟寄存器通信网络，为每个处理器提供更多的并行性。

为了提高 DMA 读取效率，本文采取一种新的方式来进行数据的读取：将 8 个计算核心中 LDM 绑为一组，通过计算核心内置 256 位高速寄存器进行数据快速交换。因此，为了减少 DMA 调用次数，将原类型三变更为 `elem%(np,np,nlve,ie)` 数组结构体实现数据的连续，减少主存通信次数。

将一个计算阵列的核组分为 8 个核组后，将存储在不同区块的数据组成一串连续的数据，使得主存与局部存储一次 DMA 通信可以读取更多的数据。这些数据原属于核组内每个从核。原本单个计算核心所读取数据并不连续，且需要多次调用函数与主存通信（通信次数取决于 Y 轴的长度）。



(a) CPEs Original

1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8	8	8	8

(b) CPEs bound

图 3 通信存储优化

Fig.3 Communication storage optimization

通过计算核心捆绑方案优化后 8 个计算核心只需要一次通信即可获取数据，如图 3 所示 1 号计算核心读取的数据由原来的读取 1 号计算的所需的数据，优化后为读取 1-8 号从核所需计算的一部分，以此类推剩下的每个计算核心 LDM 存放的仅是一部

分数据。当 LDM 从主存中读取数据完毕之后计算核心内部寄存器通过行通信总线将计算核心内部局部存储器内存储的数据进行交换，交换之后的存储结构与原存储结构相同，每个从核存储的仍是自己计算所需的数据。通过此方法在保证计算结果正确的情况下减少了主存与局部存储器的通信，利用了寄存器内部高带宽的优势同时减少了差分算法中大量的数据冗余有效利用了局部存储器的空间，在减少调用 DMA 通信次数的同时提升了计算核心计算效率。

3.4 SIMD

根据冯·诺依曼对计算机体系结构的划分，计算核心系统支持 SIMD 指令。在申威 26010 异构众核处理器中加入 SIMD 指令后，在进行大规模单指令运算时会有较大的性能提升。在进行完上述优化之后，已经实现了计算阵列与主存储器的、通信层次优化，循环中并不存在依赖的情况。在计算中使用申威 26010 系统提供的 SIMD 指令来使得并行效率进一步提升。

总的来说针对两个函数中的数据结构不同等因素，通过存储方式的重构，使用 Sunway Ahtread 工具并行达到最优的性能指标。但由于硬件上设计的不足，软件的重新设计本身就成为了主要的可行的方法，以规模的科学与新兴的高性能计算技术。根据不同数据类型，采用不同的优化方案来弥补申威 26010 在实际应用中缺少共享缓存区的缺点。

4 性能测试结果

4.1 方法性能实验结果

本文通过上述优化方案在超粘度因子的计算与超粘度因子应用计算两个函数中已经获得了较优的性能提升，为以后 CESM 在“神威·太湖之光”上移植过程中进一步的性能提升提供了基础。

测试主要内容是将原 CESM 的串行代码通过神威系统工具在“神威·太湖之光”超级计算机上进行并行运算，串行计算环境为 X86 处理器。通过本文描述方法进行实验后，具体性能结果如下：1) 在超粘度因子计算函数中使用 DMA 向量化并行后与原

串行代码相比有 3.4 倍的加速效果；2) 之后使用 BCASST 法改进后与串行代码比较性能能够达到 5.6 倍的加速；3) 因为本函数中存在大量的计算，在通过 SIMD 加速后加速比可达到 9.9 倍。

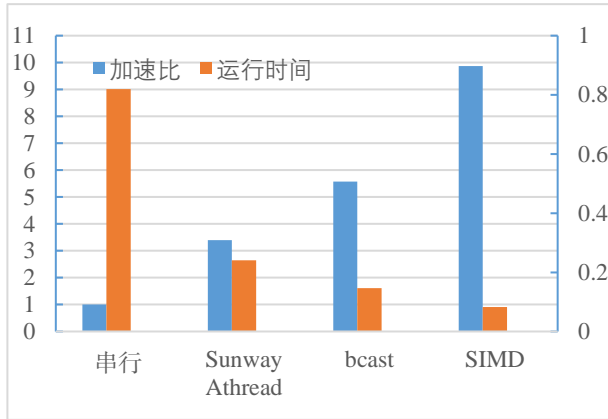


图 4 超粘度因子计算函数性能
Fig.4 Prim_hypervis performance

在超粘度应用计算函数中因为其结构的特殊性，主要使用了计算核心捆绑放对其进行优化。仅通过 DMA 向量化并行时性能的加速有 7.6 倍的加速效果，通过计算核心捆绑法后又提升了 3 倍左右的优化，最终达到了 21.2 倍的加速。

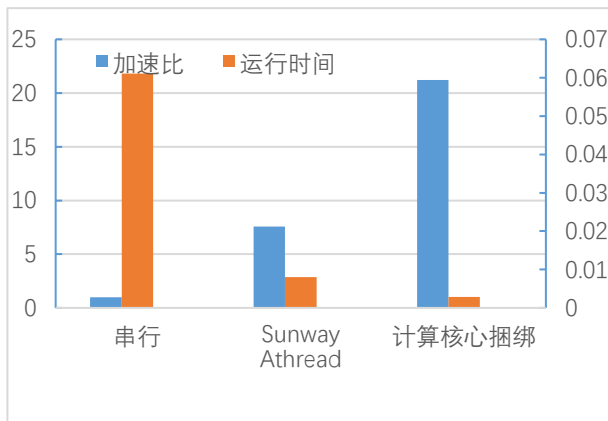


图 5 超粘度因子应用计算性能
Fig.5 Compute_and_apply performance

4.2 扩展性能测试

“神威·太湖之光”超级计算机强大的并行计算能力，我们对 CESM 进行大规模测试，我们测试 3 个规模的问题，即 ne128、ne256、ne512，从 133, 120 个内核开始进行强扩展性测试。

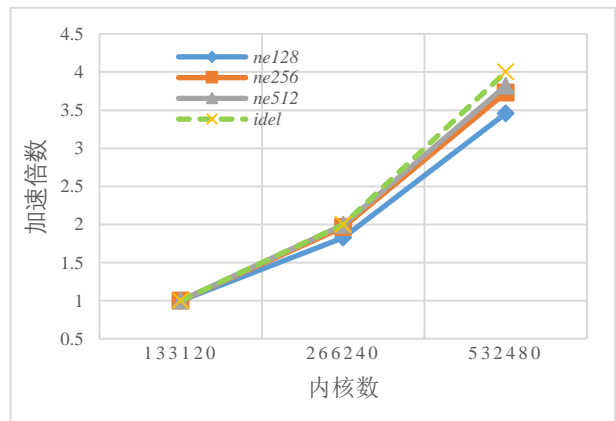


图 6 强扩展性测试

Fig.6 Strong expandability experimen

实验结果表明，我们通过数据的依赖、网络带宽、内存控制能验证了该实验具有较好的强扩展性，充分证实“神威·太湖之光”强大的计算能力。

5 结论

本文着重解决 CESM 在“神威·太湖之光”移植过程中因申威 26010 异构众核处理器架构缺少共享缓存区的问题。单个核组在进行有限差分的运算过程中产生大量数据冗余。通过申威 26010 异构众核处理器对 CESM 超粘度因子计算函数中针对有限差分算法计算等问题，作出并行优化。提出了多种通过改变主存与局部存储的方式来提升其性能。对不同的结构提出不同的方案来应对申威 26010 异构众核处理器在处理有限差分算法中的设计缺陷。虽然减少了主存与计算核心之间的访存开销，但是各个计算核心之间的通信开销会大大增大，在合理分配访存开销与计算核心之间通信开销后才能使得众核化并行性能达到最优。

通过本文多种提速的方案，在实验函数内，我们的优化很大程度实现了对 CESM 的优化。证明了针

对不同的结构的 kernel 在神威系统上通过不同的优化方案与应对策略将会有更好的提升效果,为我们继续在大型计算机上优化庞大复杂的科学仿真程序提供了重要的基础。

参 考 文 献

- [1] Xue Wei, Yang Chao, Fu Haohuan, et al. Enabling and Scaling a Global Shallow-Water Atmospheric Model on Tianhe-2[P]. Parallel and Distributed Processing Symposium, 2014 IEEE 28th International, 2014 745-754.
- [2] WANG Zhiyuan, LI Yao, LIU Bin, LIU Jian. Global Climate Internal Variability in a 2000-year Control Simulation with Community Earth System Model (CESM)[J]. Chinese Geographical Science, 2015, 25(03): 263-273.
- [3] Fu H, Liao J, Xue W, et al. Refactoring and Optimizing the Community Atmosphere Model (CAM) on the Sunway TaihuLight Supercomputer[C]. SC16, Salt Lake City, Utah, USA. November 2016 10.1145/3126908.3126909.
- [4] Qiao Fangli, Wei Zhao, Yin Xunqiang, et al. A highly effective global surface wave numerical simulation with ultra-high resolution[C]. International Conference for High Performance Computing. 2016, 1: 46-56.
- [5] Top500 committee. The 25th Top500 list on Nov 2018. [OL]. <https://www.top500.org/lists/2018/11/>.
- [6] Haohuan FU, Junfeng LIAO, Jinzhe YANG, Lanning WANG, Zhenya SONG, Xiaomeng HUANG, Chao YANG, Wei XUE, Fangfang LIU, Fangli QIAO, Wei ZHAO, Xunqiang YIN, Chaofeng HOU, Chenglong ZHANG, Wei GE, Jian ZHANG, Yangang WANG, Chunbo ZHOU, Guangwen YANG. The Sunway Taihu Light supercomputer: system and applications[J]. Science China (Information Sciences), 2016, 59(07): 113-128
- [7] Junjie Wu, Yong Liu, Baida Zhang, Xianmin Jin, Yang Wang, Huiquan Wang, Xuejun Yang. A benchmark test of boson sampling on Tianhe-2 supercomputer[J]. National Science Review, 2018, 5(05): 715-720.
- [8] Sunway TaihuLight User Guide. [OL]. <http://www.nscwx.cn/process.php?word=process&i=54>
- [9] Fu Haohuan, Liao Junfeng, Yang Jinzhe, et al. The Sunway TaihuLight supercomputer: system and applications. Science China Information Sciences, 59(7): 072001, 2016.
- [10] FU Haohuan, LIAO Junfeng, YANG Jinzhe et al. The Sunway Taihu Light supercomputer: system and applications[J]. Science China (Information Sciences), 2016, 59(07): 113-128.
- [11] Li Liandeng, Yu Teng, Zhao Wenlai, et al. Large-Scale Hierarchical k-means for Heterogeneous Many-Core Supercomputers[C]. Large-Scale Hierarchical k-means for Heterogeneous Many-Core Supercomputers. 2018 978-1-5386-8384-2/18/.
- [12] Zhang J, Zhou C, Wang Y, et al. Extreme-Scale Phase Field Simulations of Coarsening Dynamics on the Sunway TaihuLight Supercomputer[C]. International Conference for High Performance Computing. IEEE Press, 2016 978-1-4673-8815-3/16/.
- [13] Waidyasooriya H M, Takei Y, Tatsumi S, et al. OpenCL-Based FPGA-Platform for Stencil Computation and Its Optimization Methodology[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2017, PP(99): 1390-1402.
- [14] Dehghan M, Taleei A. A compact split-step finite difference method for solving the nonlinear Schrödinger equations with constant and variable coefficients[J]. Computer Physics Communications, 2010, 181(1): 43-51.
- [15] Fu H, Wang Y, Um E S, et al. A parallel finite-element time-domain method for transient electromagnetic simulation[J]. Geophysics, 2015, 80(4): E213-E224.
- [16] Eichenberger A E, Wu P, O'Brien K. Vectorization for SIMD architectures with alignment constraints[J]. ACM SIGPLAN Notices, 2004, 39(6): 1-58113-807-5/04/0006.
- [17] Smart N P, Vercauteren F. Fully homomorphic SIMD operations[J]. Designs Codes & Cryptography, 2014, 71(1): 57-81.
- [18] Xue Wei, Yang Chao, Fu Haohua. Ultra-Scalable CPU-MIC Acceleration of Mesoscale Atmospheric Modeling on Tianhe-2[J]. IEEE Transactions on Computers, 2015, 64(8): 2382-2393.
- [19] Bingwei Chen, Haohuan Fu, Yanwen Wei, Conghui He, Wenqiang Zhang, Yuxuan Li, Wubin Wan, Wei Zhang, Lin Gan, Wei Zhang, Zhenguo Zhang, Guangwen Yang, and Xiaofei Chen. 2018. Simulating the Wenchuan earth quake with accurate surface topography on Sunway TaihuLight. In Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis, SC 2018, Dallas, TX, USA, November 11-16, 2018. 40:1-40:12. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3291710>



Hongbo Chen, born in 1995. Master of Engineering. His research interests include high parallel computing and machine learning.



Lin Gan, born in 1988. PhD and Lecturer. His research interests include high parallel computing and machine learning.



Jingheng Xu, born in 1991. PhD. His research interests include high parallel computing and evolutionary algorithm.



Xuezhong Qiao, born in 1967. Associate Professor and supervisor. His main research interests include image processing and machine learning.



Xu Liu, born in 1996. Master of Engineering. Her research interests include high parallel computing and evolutionary algorithm.