

并行 I/O 技术在气候数值模式中的应用研究

魏 敏^{1,2}, 徐金秀³, 王在志⁴

(1. 中国气象局 国家气象信息中心, 北京 100081;

2. 清华大学 地球系统科学研究中心, 北京 100084;

3. 江南计算技术研究所, 江苏 无锡 214083;

4. 中国气象局 国家气候中心, 北京 100081)

摘要:在气候变化数值模拟工作中,气候数值模式运行效率主要受到计算效率和 I/O 效率的共同影响。目前,模式计算部分已经基本实现并行,计算效率显著提升。随着气候数值模式时空分辨率的提高,对 I/O 效率的需求也不断增加,数据并行 I/O 技术已经成为提高模式整体运行效率的有效方法之一。文中深入分析了 BCC_AGCM 模式串行 I/O 算法及 NetCDF 数据结构特点,采用基于 MPI-IO 的高层 I/O 库对模式 I/O 算法进行并行优化,优化后可支持多类气象要素并行输出,输出效率明显提升。为我国应对气候变化数值模式的运行效率优化工作,进行了有益的技术探索和积累。

关键词:高性能计算;气候数值模式;并行 I/O;NetCDF

中图分类号:TP312

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)12-0011-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.12.003

Study and Application of Parallel I/O Technology in Numerical Climate Model

WEI Min^{1,2}, XU Jin-xiu³, WANG Zai-zhi⁴

(1. National Meteorological Information Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

2. Center for Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Jiangnan Institute of Computing Technology, Wuxi 214083, China;

4. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract:Computational efficiency and I/O efficiency affect the efficiency of numerical climate model together in climate change numerical simulation. Model computation section has been parallelized and the efficiency significantly increased. With the improvement of spatial and temporal resolution of numerical climate model, the demand of data access efficiency is also increased dramatically. The parallel I/O technology has become an effective method to improve the efficiency of numerical climate model. In this paper, analyze the serial I/O algorithm of BCC_AGCM mode and the data structure features of NetCDF. Use high level I/O library based on MPI-IO to optimize model data interface, the new system can support parallel output of multiple meteorological elements and data output efficiency has improved significantly. Carry out useful technical exploration and accumulation for the efficiency optimization of numerical climate model.

Key words:high performance computing; numerical climate model; parallel I/O; NetCDF

0 引言

气候变化尤其是几十年到百年时间尺度的气候变化预估,关系到国家的政治、经济乃至安全等诸多方面,具有重要的科学意义和战略意义,受到各国政府及科学家越来越多的关注。气候变化数值模拟是有效应对气候变化的重要技术手段,气候数值模式是气候变

化研究最重要的、不可替代的研究工具之一。

气候数值模式计算量浩大,需要采用并行方法,方可在预期的时间内完成全部工作任务。这其中除并行计算外,也包括并行 I/O。按照业界定义,并行 I/O 为“由同一并行程序的多个进程或者多个线程产生的对文件数据的并发请求,还可以解释为并行系统或多个

处理器同时对文件或者不同磁盘上的不同数据文件进行 I/O 的并行访问”^[1]。

现阶段,气候数值模式的计算部分基本已经实现多处理器核并发完成,但是数据访问部分仍采用单处理器核串行执行。随着模式的不断发展,越来越高的时空分辨率,更多、更复杂、更精细的物理、化学和生物等过程的描述,使模式海量数据聚积,输出频率由月平均逐渐提高到日平均,甚至以小时为模拟结果输出单位,由单处理器核进行大规模数据访问的技术已经不能满足模式运行时效性需求,成为模式运行效率新的瓶颈。标志着气候变化数值模拟已成为数据密集型或 I/O 密集型应用,需要较大的数据存储容量和较高的 I/O 效率^[2-3]。同时,当负责数据访问的单处理器核在进行大量数据操作的同时,并行通讯域的其他处理器核处于等待状态,是一种潜在的计算资源浪费。因此,应用并行 I/O 技术减少模式 I/O 过程的墙钟时间,可以提高模式的整体计算效率,有效避免计算资源隐性消耗。

BCC_AGCM 是我国自主研发的第二代全球大气环流谱模式,支持 T42、T106、T266 分辨率。它是我国参加联合国政府间气候变化专门委员会第五次评估报告 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) AR5 (Fifth Assessment Report),应对气候变化研究的核心模式之一^[4]。文中主要讨论气候数值模式并行通信域中的进程与并行文件系统之间的数据交互问题,及其在 BCC_AGCM 模式中的优化应用。

1 气候数值模式的 I/O 特征分析

目前,气候数值模式的 I/O 特点表现为在计算间隔中出现密集的并发 I/O 请求^[5],在确定的阶段读写数据。模式读入某些数据,以特定积分步长,完成特定计算任务,在一定时间间隔把计算结果输出到文件。模拟数据在满足一定精度和分辨率需求时,表现形式复杂,具有如下主要特点:

- 数据规模大,部分情况达到 TB 量级;
- 数据维数多,包括三维或四维数据;
- 数据种类多,包括格点、站点、高空、地表等;
- 数据格式多,主要分为 NetCDF、GRIB、HDF 等;
- 数据文件种类多,包括模拟数据、重启动数据等等。

以全球大气环流模式 BCC_AGCM 为例,在完成对气候系统 T266 高分模拟(~ 50 km) 试验中,每日输出 1 次,每次输出 90 个气象要素场数据,每日输出数据量约为 1.6 GB,如采用此配置完成 1 年的气候模拟,总输出数据量将达到 $1.6 \times 365 = 584$ GB,而气候模拟通常要积分几十年甚至上百年,那么数据量将达到数

十 TB 量级。未来模式模拟时空分辨率越来越高,空间分辨率的提高将增加数据输出量,而时间分辨率的提高将增加数据输出频率,由此导致模式模拟数据量激增^[6-7]。

由此可知,在与现有应用兼容的前提下,基于高性能计算系统,通过对模式 I/O 算法进行并行优化^[8],提高模式数据访问效率,将成为提升模式整体运行效率的关键因素之一。

2 技术及应用现状

2.1 并行 I/O 技术发展

MPI (Message Passing Interface) 是目前应用最广的并行程序设计平台,几乎被所有并行计算环境、多进程操作系统所支持,是目前国际上最流行的并行编程环境之一。MPI 的标准化开始于 1992 年 4 月召开的分布存储环境中消息传递标准的讨论会,初始草案由 Dongarra、Hempel、Hey 和 Walker 建议,于 1992 年 11 月推出并在 1993 年 2 月完成了 MPI1.0 修订版^[9]。1997 年 7 月推出了 MPI 的扩充部分 MPI2,扩充主要包括三个方面:并行 I/O、远程存储访问和动态进程管理^[10],推动了并行 I/O 技术的研究和实现。

高性能计算系统的 I/O 应用层具体可分为 MPI-I/O 实现、高层 I/O 库和并行应用^[11]。高层 I/O 库底层通过 MPI-IO 实现,为上层应用程序提供函数接口,可以包含 HDF5^[12],Parallel NetCDF^[13]等。并行应用是实际应用问题,如气候数值模式、科学数据分析等。

2.2 在数值模式中的应用

美国地球物理流体力学实验室 (GFDL) 的海洋模式 MOM4 采用的并行 I/O 的方法是模式用 N 个进程并行执行,最终生成 N 个结果文件,在后处理过程将这些文件合并为一个完整的数据场^[14]。美国国家自然科学基金会以及美国国家海洋大气局 (NOAA) 共同资助的面向天气研究和预报的模式系统 WRF (Weather Research Forecast) 则可通过设置专用 I/O 进程的方法实现数据的并行访问。此外,欧洲委员会 (European Commission) 资助的面向气候系统建模与模拟的 PRISM (Program for Integrated earth System Modeling) 项目也支持快速并行数据访问。

并行 I/O 技术在我国气候数值模式中的实际应用还较少,大多数模式目前还采用传统的串行 I/O 方式。

3 应用实现

3.1 算法选择

文中的研究工作是在确定的系统软、硬件资源配置环境,从应用层对 BCC_AGCM 模式的 I/O 算法进行并行优化,提高其对数据的访问效率。

基于高性能计算系统从应用层角度对复杂的数值模式 I/O 算法进行并行优化,主要可以分为三类方法。第一类是数值模式所有并行通信域的进程都参与数据文件的输出,每个进程将自己负责处理的数据写入独立的文件。第二类是将要计算的数据剖分为多个逻辑数据块,分配给不同的进程进行计算和输出,所有进程的数据输出到同一个数据文件中。第三类方法是从并行通信域的进程中选出一个或多个进程专门用于 I/O。在三种方法中,第一类方法并行度最高,比较适合计算资源能够得到严格保障的应用,主要存在两个问题:其一是对模式模拟输出数据进行后处理的时候需要先将各数据文件拼接为一个完整的数据场,而这一拼接过程容易导致错误;另一个问题是数值模式大规模重启时要严格与前次计算所采用的处理器核数保持一致,计算规模配置不灵活。第二类方法可直接利用模式计算输出文件进行后处理,进行重启时计算规模可灵活配置。第三类方法比较适合于数据访问时间占模式整体运行时间比例较大的情况。

根据对 BCC_AGCM 模式运行方式和计算结构进行分析,在现阶段,模式 I/O 时间相对于计算时间比例较小,因此不建议设立专用 I/O 进程。另外,由于模式并行规模不断增大,积分时间不断延长,模式运行墙钟时间很长,计算过程中因高性能计算资源调配等问题而导致计算过程中断/重启的情况也有所增加,不建议采用第一类方法。所以,基于第二类方法设计并实现并行 I/O 算法,较为符合现阶段模式发展的需求。

3.2 技术方案

3.2.1 BCC_AGCM 模式结构及 I/O 特点

BCC_AGCM 模式采用 SPMD(Single Program Multiple Data)并行编程模型,MPI+OpenMP 混合并行方法实现,主要基于 Fortran90 语言开发。模式基本结构如图 1 所示,主要针对数据输出部分进行并行优化研究。

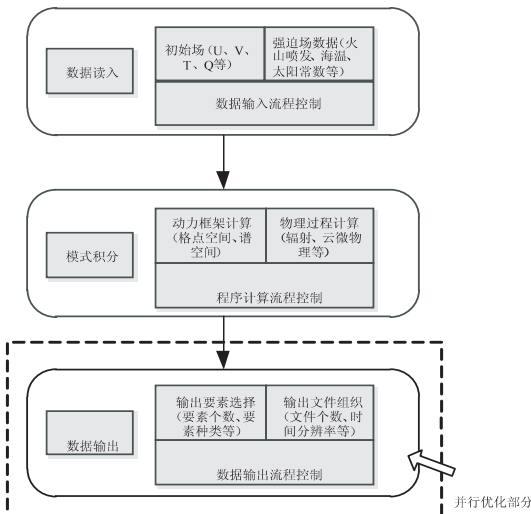


图 1 BCC_AGCM 模式结构示意图

模式主要输出文件有三类:第一类是历史文件(h 文件),采用 NetCDF(Network Common Data Form)数据格式存储的格点场数据,包含模式模拟结果。可以根据用户指定的时间频率以月、日、时为时间单位,输出要素的平均值、瞬时值、最大值和最小值。最多可以输出 6 个历史文件,它们之间可以包含不同的要素场,以不同的时次输出,可以对不同时间段的计算结果求平均值,包含不同的时次样本数,为用户提供了灵活便捷的输出文件组织方式;第二类是断点重启文件,在模式运行失败后,通过读入该文件,可以从某一时刻继续运行;第三类是为开展新的模拟试验而生成的初始场文件。由于目前模式采用串行 I/O 方式,数据输出效率成为模式整体效率的瓶颈。

3.2.2 数据格式

NetCDF 是广泛应用于气候模式的数据格式,已经成为国际上流行的标准。NetCDF 是由美国国家自然科学基金资助的 Unidata 计划开发的一套软件,支持 C/C++、Fortran77/90、Java 等语言。它主要有以下 3 个优点:

- (1)数据集包含数据的自描述信息,方便使用;
- (2)资料可以直接存取,方便定位,提高数据存取的效率;
- (3)可以跨平台读取,对计算平台没有依赖性。

NetCDF 具有多维度、多参数的特点,适用于存储如经度、纬度、层次、时间等具有多维度特征的气候资料。包含以下几个特征:

- Dimensions:多维数据结构,如 latitude, longitude, layers, time;
- Variables:多种变量,如 temperature, rain;
- Attributes:各维度和变量的属性;
- Data:数据资料部分。

目前,NetCDF 数据格式广泛应用于世界各国气候模式的研发工作中。例如,美国国家环境预报中心(NCEP)发布的再分析资料,美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的气候数据中心(CDC)发布的海洋与大气综合数据集(COADS),IPCC 组织的 AMIP(Atmospheric Model Intercomparison Project)、CMIP(Coupled Model Intercomparison Project)等各种国际模式比较计划均采用 NetCDF 作为数据格式标准。

Parallel NetCDF 由美国阿贡国家实验室(ANL)开发维护,继承了传统的 NetCDF 代码,保持 NetCDF 数据格式平台兼容性的特点。它是一个高性能的对 NetCDF 格式数据进行访问的应用编程接口,驱动底层 MPI-I/O,获得持续的并行访问性能。支持 C/C++ 和 Fortran 语言。

Parallel NetCDF 主要特点如下:

- 提供 C 和 Fortran 接口;
- 创建于 MPI-I/O 上层,提供集合 I/O;
- 具有跨不同平台的特性,与 NetCDF 兼容;
- 语法简洁,便于程序调用。

在分布式计算环境中,设应用程序运行在 4 个物理节点,每个节点有 n 个进程通过 Parallel NetCDF 对数据并行访问的架构如图 2 所示。

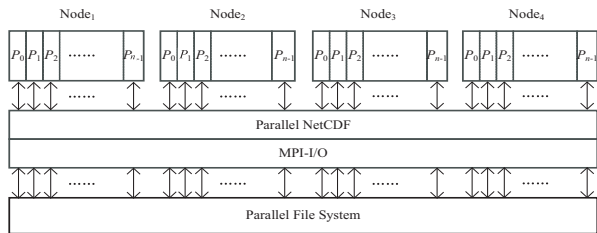


图 2 Parallel NetCDF 并行数据访问示意

由于 NetCDF 数据的优势及其广泛的应用基础,同时,为了与 BCC_AGCM 模式系统数据格式保持一致,故采用 Parallel NetCDF 高层 I/O 库实现模式算法的并行优化。

3.2.3 开发环境

为与 BCC_AGCM 模式获得更好的兼容性,选择与其一致的运行平台,在 MPP 架构业务用高性能并行计算环境进行开发,系统主要配置如下:

- 单节点 8 颗 1.7 GHz PWR4+CPU;
- 单节点内存:16 GB;
- 内部通信网络 IBM HPS (High Performance Switch);
- 操作系统:AIX 5.2.0.0;
- 编译器:XLF Fortran 11.1;
- 作业管理软件:LoadLeveler 3.3.2;
- 并行文件系统:GPFS 3.1.0;
- 并行环境:POE 4.2.2。

3.2.4 解决主要问题

(1) 计算网格与数据网格映射关系的建立。

在计算过程中,计算区域剖分方式导致数据变量在内存中的存放顺序和最终输出文件要求的存储顺序不同,在数据输出之前进行数据结构重组。使其符合 Parallel NetCDF 函数对多维数组的要求,重构模式 I/O 接口。

(2) 数据存储结构兼容性重构。

由于程序优化过程中需要使用指针数组、链表等复杂的数据结构,与模式原有数据结构不兼容,对原有程序中一系列数据结构定义,数据引用方式及数据在 Module、Subroutine 和 Function 的功能封装进行优化调整。模式约有 26 万行 Fortran 程序源代码,工作中对将近 1/3 的源程序进行了优化,并增加了 11 个 Subroutine 和 7 个 Function。

(3) 并行通信算法优化。

模式原有串行算法,在数据从内存写到文件之前,需要把全局数据收集到一个处理器核,然后用这个处理器核进行输出。并行优化后,不需要再进行集合通信,直接在每个处理器核将数据写到文件中。因此,对 I/O 算法进行优化的同时对并行通信算法也进行了优化调整。

3.3 优化效果

优化后的 BCC_AGCM 模式可实现 h 文件的并行输出;数据采用标准 NetCDF 格式,与原有模式系统无缝兼容;输出要素可选择,同时支持三维场、四维场多要素;配置流程简单,符合用户使用习惯。

3.3.1 试验设计

在 BCC_AGCM 模式完成气候系统 T266 高分模拟 (~50 km) 试验中,全球区域经纬网格数目 800×400,垂直 26 层,积分步长 180 s,积分 10 天(共 4 800 步)。以主要模拟结果文件 h 数据文件为研究对象,设置输出 90 个气象要素场数据,其中包括 TS、PS 等 34 个三维要素场,T、U 等 56 个四维要素场。每日输出 1 次,数据采用标准 NetCDF 格式存储,单文件大小约为 1.6 GB,试验总输出数据量约为 16 GB。分别对串行数据输出和不同规模并行数据输出效率进行测试。

3.3.2 效率测试

由于计算资源的限制,测试进程规模选择 16、32、64、128、256,每个规模完成 3 次测试,取测试结果的平均值。

数据 I/O 效率与系统软、硬件配置有密切关系,主要受到 I/O 能力、单节点内存配置等多种系统资源影响。由于系统底层存储架构设计及硬件结构非常复杂,文中主要从实际应用程序能够获得的系统有效 I/O 性能角度对测试结果进行分析。

由图 3 可知,在不同并行计算规模串行数据输出效率是稳定的,说明模式并行计算规模的改变不影响数据输出效率。每个节点采用 8 个进程的并行数据输出效率与串行输出效率相比有显著的提高,从原来的 50 MB/s 提高到 110 MB/s 以上,且随着并行规模的扩大,效率略微有所变化,分析主要原因是由于单节点 8 个处理器核,最多采用 8 个进程并行输出数据,在这种极端情况下,对节点内 I/O 资源的争用较为强烈,效率没有随着并行进程数的增多而提高。每个节点采用 4 个进程负责数据输出时,并行输出效率提高到 150 MB/s 以上,且随着并行规模的扩大,效率有较为明显的上升,主要是因为对 I/O 资源的争用相比于每节点采用 8 进程的情况要少,体现出并行进程数增加的优势。每个节点采用 1 个进程负责数据输出时,并行输出效率提高到 200 MB/s 以上,且随着并行规模的扩

大,效率有大幅上升,这是第二种极端情况,单进程独占节点内 I/O 资源,体现出并行进程数增加的优势。

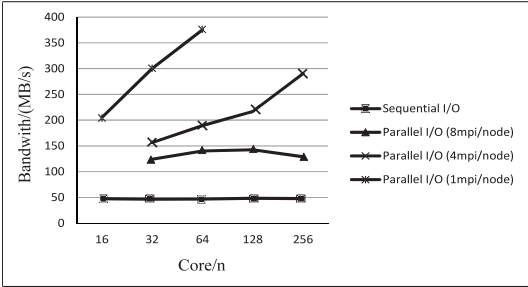


图 3 串行数据输出和并行数据输出效率对比

图 4 是对模式串行数据输出时间和并行数据输出时间的对比。由图可知,当采用串行输出时,完成 10 天积分数据输出墙钟时间需要 350 s 左右,每个节点采用 8 个进程负责数据输出时,完成同样的数据输出任务需要 120 s 左右,每个节点采用 4 个进程负责数据输出时,仅需要少于 100 s 的时间。以 256 进程(每节点 4 进程)并行规模为例,每积分 1 天,通过并行数据输出可节省墙钟时间约为 28.2 s,完成百年积分可节省墙钟时间约为 $28.2 \times 365 \times 100 / 86\,400 = 11.9$ 天,可节省系统计算资源^[15]约为 $1.7 \times 4 \times 256 \times 11.9 \times 86\,400 = 1\,789\,820\,928$ GFlop。

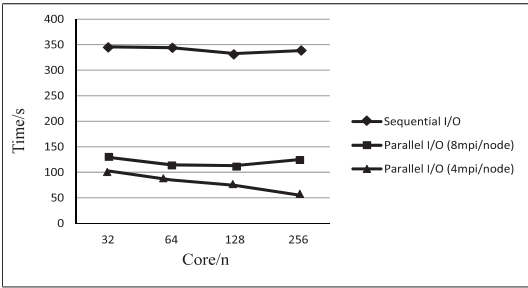


图 4 串行数据输出和并行数据输出时间对比

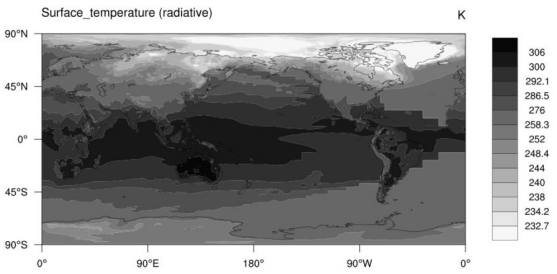
3.3.3 结果验证

如图 5 所示,以 BCC_AGCM 模式 10 天模拟全球表面温度 TS(Surface Temperature)要素场分布形势为例,全场共 800×400 个格点。图 5(a)是串行输出结果,图 5(b)是 256 进程并行输出结果,图 5(c)是两者的差异,差异为 0,表示两者精度完全一致。说明模式 I/O 并行优化后,模式计算结果精度没有损失。

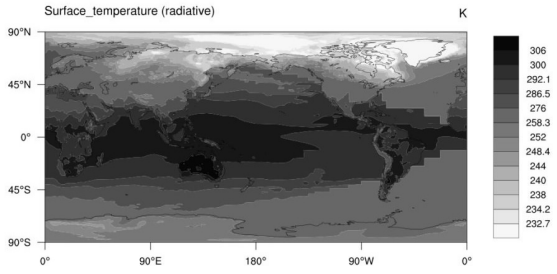
4 结束语

并行 I/O 技术在 BCC_AGCM 模式的成功应用,为其他数值模式 I/O 效率优化工作提供了重要的参考价值。为我国开展应对气候变化数值模拟工作提供了技术保障。选择与模式发展相适合的并行 I/O 策略,与现有模式应用无缝兼容的实现方法,使得对未来模式的发展和程序的进一步优化和维护都十分有益。从初步测试结果可以看到模式并行 I/O 技术是可靠和有效

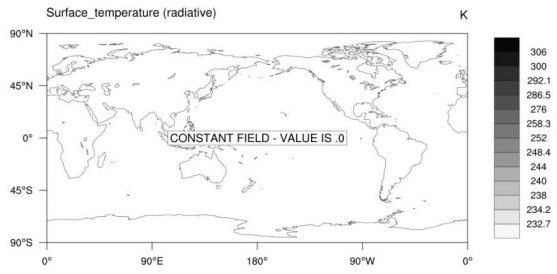
的,可以为模式整体运行效率带来明显的提升。



(a) 10 天模拟表面温度串行输出结果



(b) 10 天模拟表面温度 256 进程并行输出结果



(c) 10 天模拟表面温度 256 进程并行与串行输出结果的差异

图 5 模拟示例

从气象高性能计算应用角度来看,不管是用于天气预报的天气模式^[16],还是用于气候变化研究的气候模式,都有精细化发展的趋势,在这一发展过程中,模式 I/O 系统将得到不断的完善,程序性能将得到进一步提高,最终将发展为一个先进的高速 I/O 软件系统。

参考文献:

[1] Dongarra J, Foster I, Fox G. 并行计算综论[M]. 莫则尧,陈军,曹小林,等,译. 北京:电子工业出版社,2005.

[2] 李 亮,裴瑞华. 高性能计算平台的 IO 性能测试与分析[J]. 计算机与现代化,2011(6):160-164.

[3] Big data: the next frontier for innovation, competition, and productivity[R]. USA: The McKinsey Global Institute, 2011.

[4] Wu Tongwen, Li Weiping, Ji Jinjun, et al. Global carbon budgets simulated by the Beijing Climate Center Climate System Model for the last century[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(10): 4326-4347.

[5] 赵立成. 气象信息系统[M]. 北京:气象出版社,2011.

[6] 严霄凤,张德馨. 大数据研究[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(4): 168-172.

[7] 王 柏,胡谷雨,罗健欣. 数字地球系统中海量数据存储与

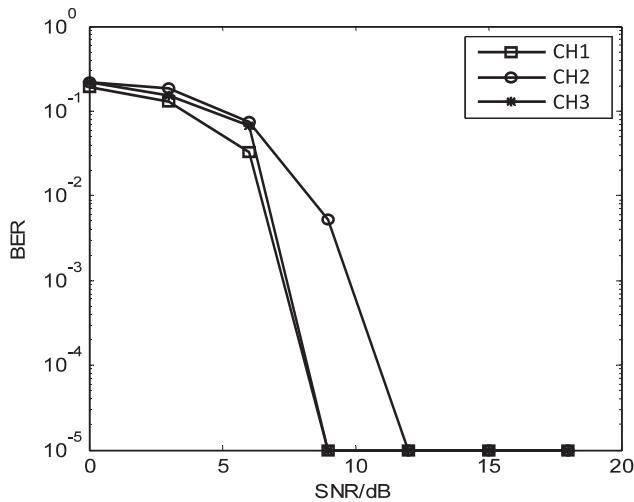


图 4 人工鱼群算法在簇内不同信道下的误码率曲线图

4 结束语

文中提出了一种基于人工鱼群算法的无线传感网簇内信号盲检测方法。所述方法采用自底向上的设计,构造了人工鱼的基本模型以及其各行为的模型,根据基本鱼群优化算法的流程推导实现步骤,研究和分析了人工鱼群算法的各个参数对算法结果的影响,以及算法对无线传感网簇内信道条件的鲁棒性。仿真实验结果表明基于人工鱼群的盲检测算法是一种在无线传感网簇内信号盲检测应用中十分行之有效的方法。

参考文献:

[1] Li Xiaohua. Blind channel estimation and equalization in wireless sensor networks based on correlations among sensors [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53 (4): 1511-1519.

[2] Li Xiaohua. Blind channel identification and equalization in dense wireless sensor networks with distributed transmissions [C]//Proc of 2004 IEEE international conference on acoustics, speech, and signal processing. Montreal, Quebec, Canada: IEEE, 2004.

[3] 吴 越. 串行算法并行化处理的数学模型与算法描述[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(5): 14-18.

[4] 莫则尧, 袁国兴. 消息传递并行编程环境—MPI [M]. 北京: 科学出版社, 2011.

[5] 都志辉. 高性能计算并行编程技术—MPI 并行程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

[6] 于忠亮. 并行计算中的 I/O 问题研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2010.

[3] Cui Shuguang, Goldsmith A J, Bahai A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(6): 1089-1098.

[4] 李晓磊. 一种新型的智能优化方法—人工鱼群算法 [D]. 杭州: 浙江大学, 2003.

[5] 李晓磊, 钱积新. 人工鱼群算法: 自下而上的寻优模式 [C]//过程系统工程 2001 年会论文集. 出版地不详: 出版者不详, 2002.

[6] Jiang Mingyan, Wang Yong, Pfletschinger S, et al. Optimal multiuser detection with artificial fish swarm algorithm [C]//Proceedings of international conference on intelligent computing. [s. l.]: [s. n.], 2007: 1084-1093.

[7] 廖灿星, 张 平, 李行善, 等. 基于混合人工鱼群算法的传感器网络优化 [J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(3): 373-377.

[8] 王 蕊, 刘国枝. 基于鱼群优化算法的无线传感器网络部署 [J]. 振动与冲击, 2009, 28(2): 8-11.

[9] 周利民, 杨科华, 周 攀. 基于鱼群算法的无线传感网络覆盖优化策略 [J]. 计算机应用研究, 2010, 27(6): 2276-2279.

[10] Jiang M Y, Yuan D F. Wavelet threshold optimization with artificial fish swarm algorithm [C]//Proceedings of international conference on neural networks and brain. [s. l.]: [s. n.], 2005: 569-572.

[11] Jiang M Y, Mastorakis N E, Yuan D F, et al. Multi-threshold image segmentation with improved artificial fish swarm algorithm [C]//Proceedings of European computing conference. [s. l.]: [s. n.], 2007: 35-38.

[12] Zhang M F, Shao C, Li F C, et al. Evolving neural network classifiers and feature subset using artificial fish swarm [C]//Proceedings of the 2006 IEEE international conference on mechatronics and automation. [s. l.]: IEEE, 2006: 1598-1602.

[13] 曹承志, 张 坤, 郑海英, 等. 基于人工鱼群算法的 BP 神经网络速度辨识器 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(4): 1047-1050.

[14] 王 静. 人工鱼群算法在盲检测中的研究与应用 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.

(上接第 15 页)

[12] HDF5 [EB/OL]. 2013-11-15. <http://www.hdfgroup.org/>.

[13] Parallel NetCDF [EB/OL]. 2013-12-23. <http://cucis.ece.northwestern.edu>.

[14] 王志斌, 万玉发, 沃伟峰. 天气雷达组网拼图并行处理方法研究 [J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(7): 187-190.

[15] 王 彬, 肖文名, 李永生, 等. 华南区域中心计算资源管理系统的建立与应用 [J]. 气象, 2011, 37(6): 764-770.

[16] 高晋芳, 迟学斌, 姜金荣. WRF 数值气象预报模式系统在深腾 6800 上的移植与测试 [J]. 计算机应用研究, 2007, 24(6): 245-247.

并行I/O技术在气候数值模式中的应用研究

作者：[魏敏](#)，[徐金秀](#)，[王在志](#)，[WEI Min](#)，[XU Jin-xiu](#)，[WANG Zai-zhi](#)
作者单位：[魏敏, WEI Min\(中国气象局 国家气象信息中心, 北京 100081; 清华大学 地球系统科学研究中心, 北京 100084\)](#)，[徐金秀, XU Jin-xiu\(江南计算技术研究所, 江苏 无锡, 214083\)](#)，[王在志, WANG Zai-zhi\(中国气象局 国家气候中心, 北京, 100081\)](#)
刊名：[计算机技术与发展](#)[ISTIC](#)
英文刊名：[Computer Technology and Development](#)
年，卷(期)：2014(12)

引用本文格式：[魏敏](#). [徐金秀](#). [王在志](#). [WEI Min](#). [XU Jin-xiu](#). [WANG Zai-zhi](#) [并行I/O技术在气候数值模式中的应用研究](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2014(12)