

基于 MPI+OpenMP 混合编程模型的水声传播并行算法

张 林, 笪良龙, 范培勤

(海军潜艇学院, 山东 青岛 266071)

摘 要: 声波是目前唯一能够在海水介质中进行远距离传播的有效载体, 因此水下声传播成为海洋声学研究的主要内容之一, 对现代声纳的设计和使用具有重要意义. 宽带声传播、浅海地声反演、匹配场定位、水下环境仿真等技术的发展对水声传播提出了越来越高的要求, 如何充分利用声传播模型和现代计算机技术实现声传播的快速计算已成为水声技术的一个重要研究方向. 针对曙光 TC4000L 高性能机群系统计算节点多核处理器的组成特点, 采用 MPI+OpenMP 并行混合编程模型实现了射线-简正波-抛物方程模型并行算法. 测试分析结果表明, 设计的并行算法具有较高的并行计算效率.

关键词: 水声传播; 并行计算; MPI; OpenMP

中图分类号: P733.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)08-0195-03

Parallel Underwater Acoustic Propagation Algorithm with MPI+OpenMP

ZHANG Lin, DA Liang-long, FAN Pei-qin

(Navy Submarine Academy, Qingdao 266071, China)

Abstract: Underwater sound propagation modeling is always one of the most important and popular problems in underwater warfare environment because sound is now the only medium which can propagate long range in the ocean. It is of important significance to the design and application of sonar. With the development of theory and technology of broadband sound propagation, shallow water geoacoustic inversion, matched-field source localization, underwater simulation, an efficient method for sound field calculation is very important. The parallel algorithm in the underwater sound propagation modeling is studied. According to the framework of DAWNING 4000L high performance computer and under MPI+OpenMP parallel hybrid programming model, the parallel algorithm of ray-mode-parabolic equation model is designed. Computer experiments and performance analysis showed that the parallel program increases parallel efficiency and good expansibility.

Key words: underwater sound propagation; parallel algorithm; MPI; OpenMP

1 引言

近年来,随着宽带声传播、浅海地声反演、匹配场定位、水下环境仿真等问题的深入研究,在计算速度与精度方面对水声传播提出了越来越多的要求.从理论上讲,单纯依靠修改模型本身来减少计算时间的空间已经很小,这就要求在开发新模型算法的同时,必须寻找解决这个问题的新途径,在这种情况下,

人们开始将研究的着眼点转向基于硬件平台的并行计算.多年来随着大规模集成电路技术的不断发展,以多 CPU 为基础的高性能计算机得到迅猛发展,其高端系统正向着百万亿、千万亿次的计算速度迈进.深腾系列、曙光系列、银河系列等高性能并行计算机广泛应用于天气、地震预报、军事水文保障、作战模拟仿真、情报分析处理、遥感探测和网络管理等应用领域.本文将高性能计算引入到水下声

收稿日期: 2011-06-01; **修回日期:** 2011-06-30

基金项目: 国防预研基金(9140A03050206JB1501);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET)

传播的计算中,采用 MPI+OpenMP 混合并行编程模型,在曙光 TC4000L 高性能机群系统环境下研究水下声场并行算法。

2 水声传播模型

海洋环境存在由声速剖面、海底地形及海底底质引起的水平不均匀性,这些环境的变化将对声传播产生强烈影响.对于水平变化较大的海洋环境,必须考虑水平变化对声场的影响.文献[1]中在简正波-抛物方程理论^[2,3]的基础上提出了基于 WKBZ 理论的耦合简正波-抛物方程理论,在垂直方向采用 WKBZ 理论进行本地简正波分析,在水平方向采用抛物方程方法求解简正波幅值方程,具有计算速度快的优点,本文将波束位移射线简正波理论^[4]应用于简正波-抛物方程理论,建立射线-简正波-抛物方程模型。

海洋环境中,海面为自由平面,海底为分段变化的不平海底,则柱坐标中简谐点源作用下水平变化声道中声场满足波动方程:

$$\frac{\rho}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \frac{\omega^2}{c^2(r, z)} p = -\frac{\delta(r) \delta(z - z_s)}{2\pi r} \quad (1)$$

采用简正波-抛物方程理论求解波动方程(1)式,可得如下形式的解:

$$p(r, z) = r^{-1/2} \sum_{n=1}^{\infty} u_n(r) \Phi_n(r, z) / v_n(r) \quad (2)$$

式中, $v_n(r)$ 为本地简正波本征值, $\Phi_n(r, z)$ 为相应的本征函数,应用波束位移射线简正波理论进行求解,满足式(3)、(4):

$$\rho \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \Phi_n(r, z)}{\partial z} \right) + (k^2(r, z) - v_n^2(r)) \Phi_n(r, z) = 0 \quad (3)$$

$$\int_0^H \frac{1}{\rho} \Phi_m \Phi_n dz = \delta_{mn} \quad (4)$$

将式(2)代入式(1),利用式(3)、(4),并忽略 $\Phi_n(r, z)$ 对 r 的二阶偏导数,可得简正波幅值 $u_n(r)$ 满足:

$$\frac{\partial^2 u_m(r)}{\partial r^2} + v_m^2(r) u_m(r) = - \sum_{n=1}^{\infty} \left[2B_{mn}(r) \frac{\partial u_n(r)}{\partial r} \right] \quad (5)$$

式中, $B_{mn}(r)$ 为耦合系数,定义为

$$B_{mn}(r) = \int_0^H \frac{\Phi_m(r, z)}{\rho} \frac{\partial \Phi_n(r, z)}{\partial r} dz$$

将式(5)写为矩阵形式,进行算子分离,并忽略

高阶耦合项的影响,可得

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial r} = -\mathbf{B} \mathbf{u} + i \sqrt{\mathbf{V}} \mathbf{u} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{u}$ 为简正波系数矩阵, $\mathbf{B}$ 为耦合系数矩阵, $\sqrt{\mathbf{V}}$ 为本地简正波本征值矩阵。

式(6)可用分裂步抛物方程法求解,得到的解为射线-简正波-抛物方程(RMPE)解。

3 MPI+OpenMP 混合编程

为了充分利用机群系统多层次体系结构的特点,采用 MPI+OpenMP 的混合编程模型^[5].这种混合编程模型提供节点内和节点间的两级并行,能充分利用共享存储编程(OpenMP)模型和消息传递编程(MPI)模型的优点,很好地映射了多处理器计算机组成的机群体系结构。

混合编程模型结构如图 1 所示. MPI 并行位于上层,用来表示节点间的并行;OpenMP 位于下层,用来表示节点内的并行.首先对问题进行 MPI 分解,每个 MPI 进程被分配到一个 SMP 节点上,进程间使用消息传递交换信息,在每个 MPI 进程中,使用 OpenMP 制导指令创建一组线程,并分配到 SMP 节点的不同处理器上并行的执行。

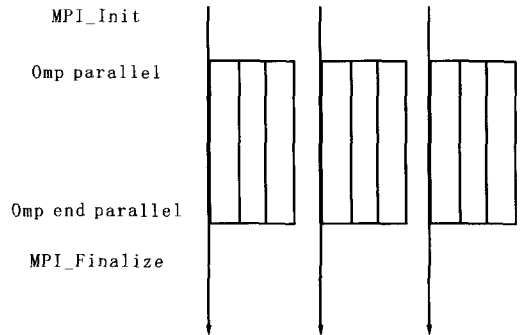


图 1 MPI+OpenMP 混合编程模型

采用 RMPE 计算声场的过程中,在深度和水平距离上将空间进行网格化,在深度上均匀的取 M 层,即 M 个接收深度,在距离上分为 R 步,通过分裂步方法递推出同一接收深度上不同距离上的传播损失值.这一过程中,对于不同的接收深度,声场的计算形式相同,只是计算的接收深度不相同,是一个循环过程,因此比较适合采用粗粒度并行化方法.对于同一深度、不同的计算距离,由于它们之间存在数据依赖关系,即此步的结果依赖于上一步的结果,因此 r 与 $r + \Delta r$ 处的计算之间无明显的并行性,但是在所有距离点上,均需计算本地本征值、本征函数、耦合系数以及矩阵的逆计算,这恰恰是最耗费计算时间

的,而不同距离上的这些计算却无依赖关系,当所有距离上的这些计算完成后可以将其值存在共享内存中,通过递推关系得到不同距离上的传播损失值,其关系如图2所示,这一过程比较适合采用共享内存模型实现并行计算。

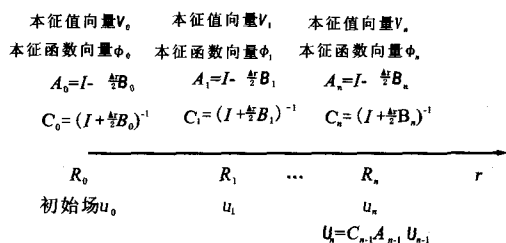


图2 RMPE模型水平递推关系图

通过对 RMPE 声场计算的并行性分析,并考虑曙光 TC4000L 的体系结构特点,可以采用深度和距离两级并行策略实现 RMPE 声场的并行计算,深度并行位于上层,分配到不同节点上,采用 MPI 模型实现;距离并行位于下层,在节点内采用 OpenMP 模型实现。

4 并行计算性能仿真

为了检验并行算法的效能,对如图3所示海洋环境的声传播问题进行了计算. 计算频率 100 Hz, 声源深度 100 m, 水平距离步长 250 m, 计算最大距离 128 km, 接收深度的选取分两种, 一种是从海面至 5 100 m, 间隔 20 m 取一个点, 计算规模为 256×512 网格, 第二种为从海面至 5 080 m, 间隔 40 m 取一个点, 计算规模为 128×512 网格. 在曙光 TC4000L 机群系统上分别用 1~64 个节点并行计算水下声场。

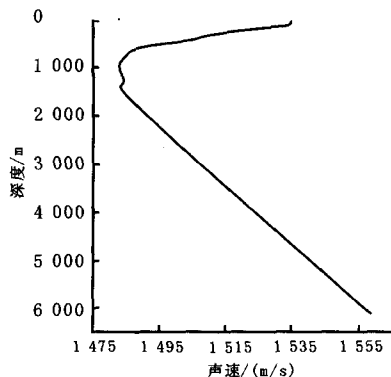


图3 测试用的海洋环境

从计算的加速比、效率图(图4、图5)可以看出随着计算节点数的增加,并行计算的加速比也是增加的,而且与并行计算节点数基本成正比关系,但并行计算的效率略有下降,这说明该并程序在分布

式并行计算环境中具有较好的可扩展性,同时也可以看出,要获得较高的加速比,应随处理机数目的增加而增加问题的规模,而不是固定问题的规模,并行计算为进行实时水下声场仿真创造了条件。

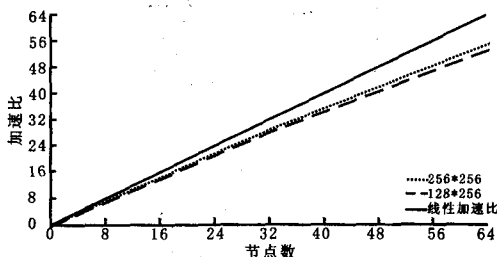


图4 声场并行计算加速比

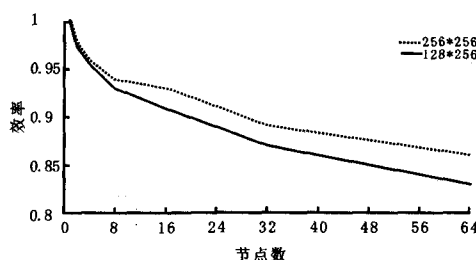


图5 声场并行计算效率

5 结束语

高性能并行计算机的出现和发展,为水声传播的并行算法提供了强大的物质保证. 本文在曙光 TC4000L 高性能机群系统上,采用 MPI+OpenMP 混合并行编程模型,实现了射线-简正波-抛物方程模型并行算法,测试结果表明,设计的并行算法具有较高的并行计算效率。

参考文献:

- [1] 彭朝晖,李风华. 基于 WKBZ 理论的耦合简正波-抛物方程理论[J]. 中国科学: A 辑, 2001, 31(2): 166-172.
- [2] Collins M D. The adiabatic mode parabolic equation[J]. J Acoust Soc Am, 1993, 94(4): 2269-2278.
- [3] Ahmad T Abawi, W A Kuperman, Michael D Collins. The coupled mode parabolic equation[J]. J Acoust Soc Am, 1997, 102(1): 233-238.
- [4] 张仁和,李风华. 浅海声传播的波束位移射线简正波理论[J]. 中国科学: A 辑, 1999, 29(3): 241-251.
- [5] 陈文光,武永卫. MPI 与 OpenMP 并行程序设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

作者简介:

张林 男, (1979-), 博士, 讲师. 研究方向为水声建模并行算法。