第38卷　第18期
Vol.38　No.18
计　算　机　工　程
Computer Engineering
2012年9月
September 2012
·工程应用技术与实现·　文章编号：1000—3428(2012)18—0225—03　文献标识码：A　中图分类号：TP338.6

梯度法求解弹道导弹扰动引力的并行方法研究

徐晓东，赵建亭，许春雷
(江苏自动化研究所，江苏 连云港 222006)

摘　要：根据远程弹道导弹在发射过程中对外部空间扰动引力场信息的需求，运用梯度法对外部空间扰动引力进行研究，为克服远程弹道导弹扰动引力计算模型复杂、计算量大、不容易在弹上计算机上实时计算的缺点，利用3台计算机组成主从模式并行计算模型，快速解算外部空间扰动引力。实验结果表明，该并行方法可以满足弹载计算机快速计算的要求，并能达到较高的精度。

关键词：外部空间扰动引力；梯度法；主从模式；并行计算；弹道导弹；快速计算；负载均衡

Research on Parallel Method of Solving Trajectory Missile Disturbing Gravity Using Gradient Method

XU Xiao-dong, ZHAO Jian-ting, XU Chun-lei
(Jiangsu Automation Research Institute, Lianyungang 222006, China)

【Abstract】In order to solve the demand of the information about the effect of the disturbing gravitation on the long-range missile emission in the outside space of earth, this paper adopts gradient method to solve the disturbing gravity in the outside space. To solve the problem that it costs a lot of time and can not be calculated in time when it computes the disturbing gravity about long-range missile as well as its complex model. It adopts the parallel method of principal and subordinate mode. Experimental result shows that adopting parallel method to solve the disturbing gravity of trajectory missile can reach the demand of fast computing by computer and get a high precision.

【Key words】disturbing gravity of outside space; gradient method; principal and subordinate mode; parallel computing; trajectory missile; fast computing; load balancing

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.18.060

1　概述

弹道导弹在飞行过程中要时刻受到地球引力场的作用，由于真实地球形状与正常椭球体形状不完全一致以及真实地球质量分布不均匀(前者是几何学影响，后者是动力学影响)所造成的实际引力与正常引力间存在差别，这种差别会对导弹的制导控制和命中精度产生一定的影响。对于射程在数千公里以上的远程弹道导弹来说，地球引力场扰动误差会引起很大的导弹落点偏差，因此，测定整个弹道导弹飞行过程中的扰动引力就显得尤为重要[1]。

导弹的三大主要战术技术指标中的射程和射击精度，完全取决于导弹主动段关机点位置和速度大小及其方向等参数。而导弹在整个主动段飞行过程中，地球引力场发挥着重大的作用，由于远程弹道导弹始终在地球引力场中飞行，时刻受到地球引力场的巨大作用，因此正确表示地球引力场的长波全球特性、建立发射区的详细重力场模型以及实时快速求算出弹道点引力参数，是提高远程弹道导弹打击精度的关键[2]。本文研究外部空间扰动引力，采用并行的方法来快速解算外部空间扰动引力。

2　梯度法原理

在外部空间点的扰动引力这种方法中，主要是在阵地坐标系($ox_dy_dz_d$)中进行计算的，该坐标系原点取在发射点，oz_d轴沿发射点铅垂线，向上为正，ox_d轴位于发射点水平面内，且指向正东方向，oy_d轴与ox_d、oz_d轴构成右手直角坐标系，指向正北方向，如图1所示，其中，w为自转速度；O_e’为地心。

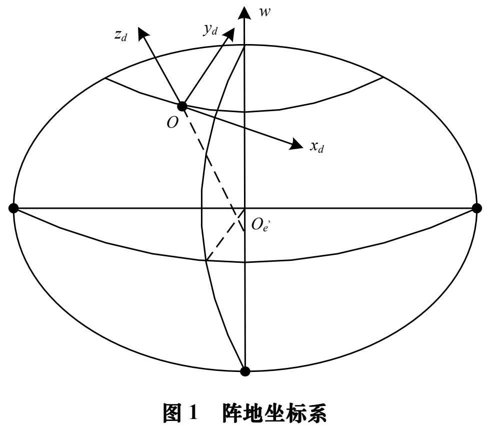

图1　阵地坐标系

作者简介：徐晓东(1988－)，男，硕士研究生，主研方向：系统工程；赵建亭、许春雷，研究员
收稿日期：2011-11-02　**修回日期：**2011-12-30　**E-mail：**527116842@qq.com

在工程应用中，在发射点附近 n 个方向上的 n 个地面点重力实测值为依据，应用最小二乘法原理所确定的扰动引力分量的水平梯度来计算。首先确定发射点附近各地面点的天文经纬度(B_{Ti}, λ_{Ti})、大地经纬度(L_i, B_i)、高程(h_i)、地心距离(r_i)、球面半径(R_i)、地心经纬度(ψ_{si}, λ_{si})和重力值(γ_i)(在发射点周围不大区域内的 n 个方向上，选取 n 个地面点同时进行测量)。其次由于空间同一点处的扰动引力位与扰动重力位相等，因此发射点及其周围空间各点处扰动引力等于其扰动重力[3]，设发射点及其周围各点处实测重力为 γ_i，正常重力为 $\acute{r}_i$，则：

$$\begin{cases}\gamma_{x0}=\gamma_{y0}=0\\ \gamma_{z0}=-\gamma_0\end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases}\gamma_{xi}=\gamma_i\cos B_{Ti}\sin(\lambda_T-\lambda_{Ti})\\ \gamma_{yi}=\gamma_i\sin(B_T-B_{Ti})\\ \gamma_{zi}=-\gamma_i\end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases}\bar{\gamma}_{xi}=(-\bar{\gamma}_{ri}\cos\varphi_{s0}+\bar{\gamma}_{ni}\sin\varphi_{si})\sin(\lambda_T-\lambda_{Si})\\ \bar{\gamma}_{yi}=-\bar{\gamma}_{ri}\sin(B_T-\varphi_{si})+\bar{\gamma}_{ni}\cos(\bar{B}_T-\varphi_{Si})\\ \gamma_{zi}=\gamma_{ri}\cos(B_T-\varphi_{si})+\bar{\gamma}_{ni}\sin(\bar{B}_T-\varphi_{Si})\end{cases} \tag{3}$$

于是，第 i 地面点的扰动引力分量计算值与其扰动重力值之差可以表示成：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\delta_x}{\partial x}x_i+\dfrac{\partial\delta_x}{\partial y}y_i+\dfrac{\partial\delta_z}{\partial x}z_i+(\delta_{x0}-\delta_{xi})=u_i\\ \dfrac{\partial\delta_x}{\partial y}x_i+\dfrac{\partial\delta_y}{\partial y}y_i+\dfrac{\partial\delta_z}{\partial y}z_i+(\delta_{y0}-\delta_{yi})=v_i\\ \dfrac{\partial\delta_z}{\partial x}x_i+\dfrac{\partial\delta_z}{\partial y}y_i-(\dfrac{\partial\delta_x}{\partial x}+\dfrac{\partial\delta_y}{\partial y})z_i+(\delta_{z0}-\delta_{zi})=w_i\end{cases} \tag{4}$$

利用最小二乘法原理($\sum_{i=1}^{n}(u_i^2+v_i^2+w_i^2)=min$)可以得到扰动引力分量水平梯度的正则方程组：

A*×*X*=*B

其中，***A*** 为 5×5 矩阵；***B***、***X*** 为向量[4]：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}\sum_{i=1}^{n}(x_i^2+z_i^2) & \sum_{i=1}^{n}x_iy_i & 0.0 & \sum_{i=1}^{n}z_i^2 & \sum_{i=1}^{n}(-y_iz_i)\\ \sum_{i=1}^{n}x_iy_i & \sum_{i=1}^{n}(x_i^2+y_i^2) & \sum_{i=1}^{n}y_iz_i & \sum_{i=1}^{n}x_iy_i & \sum_{i=1}^{n}x_iz_i\\ 0.0 & \sum_{i=1}^{n}y_iz_i & \sum_{i=1}^{n}(x_i^2+z_i^2) & \sum_{i=1}^{n}(-x_iz_i) & \sum_{i=1}^{n}x_iy_i\\ \sum_{i=1}^{n}z_i^2 & \sum_{i=1}^{n}x_iy_i & \sum_{i=1}^{n}(-x_iz_i) & \sum_{i=1}^{n}(y_i^2+z_i^2) & 0.0\\ \sum_{i=1}^{n}(-y_iz_i) & \sum_{i=1}^{n}x_iz_i & \sum_{i=1}^{n}x_iy_i & 0.0 & \sum_{i=1}^{n}(y_i^2+z_i^2)\end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial\delta_x}{\partial x}\\ \dfrac{\partial\delta_x}{\partial y}\\ \dfrac{\partial\delta_z}{\partial x}\\ \dfrac{\partial\delta_y}{\partial y}\\ \dfrac{\partial\delta_z}{\partial y}\end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}z_i(\delta_{z0}-\delta_{zi})-x_i(\delta_{x0}-\delta_{xi})\\ -x_i(\delta_{y0}-\delta_{yi})-y_i(\delta_{x0}-\delta_{xi})\\ -z_i(\delta_{x0}-\delta_{xi})-x_i(\delta_{z0}-\delta_{zi})\\ z_i(\delta_{z0}-\delta_{zi})-y_i(\delta_{y0}-\delta_{yi})\\ -z_i(\delta_{y0}-\delta_{yi})-y_i(\delta_{z0}-\delta_{zi})\end{bmatrix} \tag{7}$$

由关系式可求出扰动引力在上述5个方向的扰动引力分量，其中，n 值是任意选取的正整数，一般来讲，n 值越小，扰动引力分量的水平梯度计算精度就越低；反之，n 值越大，扰动引力分量的水平梯度计算精度就越高[5]，但计算的工作量也就相应增加，因此采用并行的方法，在提高水平梯度计算精度的同时，减少整个过程的计算时间来提高计算的实时性。

3 MPI 并行编程

并行计算是指在并行计算机上，将一个应用分解成多个子任务，分配给不同的处理器，各个处理器之间相互协同，并行地执行子任务，从而达到加快求解速度，或者提高求解应用问题规模的目的。性能评价和优化是设计高效率并行程序必不可少的重要工作，常用的并行程序性能评价标准有并行程序执行时间、并行加速比和并行效率。

MPI(Message Passing Interface)是目前最重要的一种并行编程工具和环境，它能运行在所有的并行平台上，将功能、高效和移植性这 3 个重要而又相互矛盾的方面很好地融为一体。MPI 是一个消息传递接口的标准，用于开发基于消息传递的并行程序，为用户提供了一个实际可用的、可移植的、高效的和灵活的消息传递接口库。MPI 以语言独立的形式来定义消息传递接口库，并提供了与 C 和 FORTRAN 语言的绑定。目前已经在 PC/Windows、所有主要的 Unix 工作站以及并行机上得到实现[6]。它具有以下特点：(1)它只是一个支持并行计算的程序库，并不是一个并行操作系统；(2)通信效率很高，可靠性很好；(3)没有严格要求底层的通信协议，消息传递接口标准只是对于应用程序的通信程序库而言，至于下层的硬件、协议完全由用户自己决定；(4)提供了点对点通信和全局通信的方式。

主从模式是一种比较常用的并行计算架构模式，它由一组相互紧密关联的进程组成，用来执行相同的程序，其中有一个控制进程成为主进程，其余的进程称为从进程，在整个并行计算过程中，由主进程负责进程的生成、初始化、收集并显示计算结果并适当地参与运算，其余的从进程负责执行各自的局部计算和计算结点间的通信，待计算完成后将计算结果回送给主进程，子进程的负载或者由主进程分配(有静态分配与动态分配 2 种)，或者由进程本身分配。其基本架构模式[7]如图 2 所示。

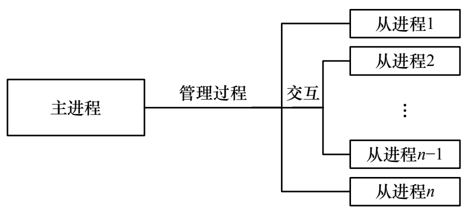

图 2 主从模式架构

4　并行程序设计与分析

梯度法解地球外部空间扰动引力的方法，需要知道发射点及其周围 n 个点的相关数据，随着 n 值的增大，梯度法解算的计算量增加很快，即使使用最快的单机也往往需要较长的计算周期，用 MPI 实现梯度法解外部空间扰动引力的并行化，能在主从模式的并行机上取得比较理想的加速比和并行效率。

负载均衡问题是影响并行效率的主要因素，本文中采用的是交叉分配的策略，使每个处理器中的计算量基本相同，能够满足负载均衡的要求，在计算与通信之间加入同步(MPI_Barrier(comm))以免产生死锁和数据遗失现象。同时，为了克服恶劣环境下某 CPU 可能出现故障，导致并行机无法完成地球外部空间扰动引力的计算问题，在程序中设想了用管理机(CPU0)去取代 CPU0、CPU1 的方法，设置参数 flag，CPU1 和 CPU2 正常工作时，flag=0，如果 CPU0 出现故障，则 flag 设置成 1，如果 CPU2 出现故障，则 flag 设置成 2，如果 flag=1，则用 CPU0 去执行 CPU1 的程序，如果 flag=2，则用 CPU0 去执行 CPU2 的程序。这样可以提供程序执行冗余，来提高系统的稳定性和安全性。程序设计框图如图 3 所示。

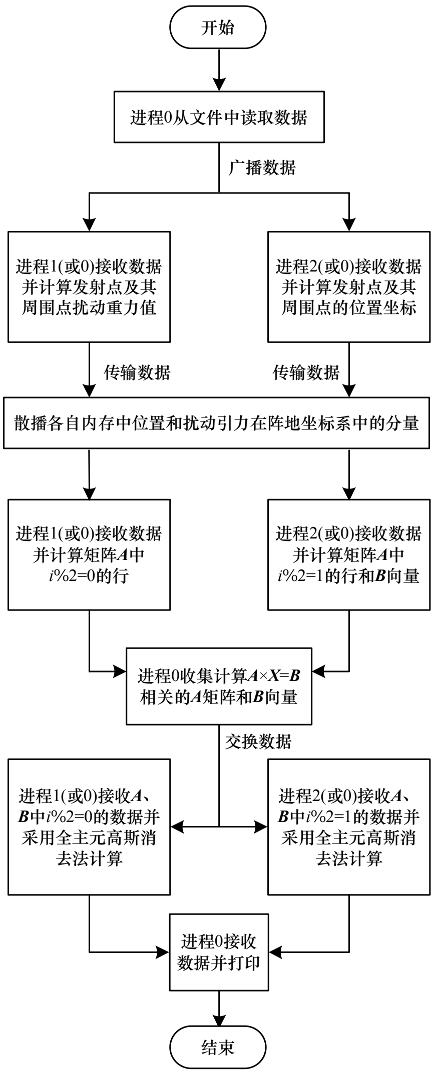

图 3　并行程序流程

为了克服程序中大量数据存储的问题，本文采用的是由 3 个 CPU 组成的主从模式的并行架构机、分布式共享存储的并行机和在 3 个 CPU 中分别存储数据，由进程 0 读取数据，通过广播的方式发送数据，即 MPI_Bcast (buffer、count、datatype、root、comm)接收数据时采用收集的方式，即 MPI_Gather(sendbuf、sendcount、sendtype、recvbuf、recvcount、recvtype、root、comm)。实验证明通过广播和收集的方式收发数据比普通地发送(MPI_Send)和接收(MPI_Recv)操作有更高的效率。

在本文中，椭球体长半轴长度 a=6 378 140 m，地心引力常数 Fm=3.986 005×10^{14} m^3/s^2，地球自转角速度 w=7.292 115×10^{-5}rad/s，地球形状动力学系数 $J2$=1.082 63×10^{-3}，各地面点的天文经纬度(B_{Ti}, λ_{Ti})、大地经纬度(L_i, B_i)、高程(h_i)、地心距离(r_i)、球面半径(R_i)、地心经纬度(ψ_{si},λ_{si})和重力值(γ_i)[8]取自连云港地区的坐标参数，通过 Matlab 在−0.1~0.1 之间产生随机数来模拟该地区 10 km 范围内的地球重力值异常。

为了比较并行程序与串行程序的计算效率，本文在采用输入相同数据的情况下，比较并行程序与串行程序的执行时间，并计算并行加速比。加速比的定义：针对某一问题，假定分别采用 1,2,⋯,i 个 CPU 进行计算，相应的耗时分别是 $t_1,t_2,\cdots,t_i$，则 i 个 CPU 对应的加速比为 t_1/t_i。表 1 是在联想 R350(CPU 为 INTEL XEON E5530)8 核服务器中搭建的并行 Linux 工作站中，启动 3 个进程，采用主从模式，进程 0 是管理机，进程 1、2 是执行机，采用不同数目该地区的重力异常值模拟得到该地区的扰动引力梯度值，并得到并行程序的加速比和效率。

表 1　不同数目外部空间点对应的加速比与效率

CPU 数目	地面点数目	串行时间/ms	并行时间/ms	并行加速比	并行效率/(%)
2+1	1 800	23.4	19.8	1.181	39.4
2+1	2 800	37.6	28.5	1.319	43.9
2+1	3 800	48.2	34.8	1.385	46.2

由表 1 可以看出，随着 n 值的增加，并行加速比和并行效率可以得到很好的提升，能获得比较好的实时性和快速计算效果。

5　结束语

本文在 Linux 环境下应用 MPI 技术实现了梯度法解地球外部空间扰动引力的并行计算，由于 Linux 自身的特点，即极高的效率、稳定、对硬件的要求低、并且支持多进程、具有很好的安全性能等优点，在设计复杂实时系统时，可以较好地提高系统的可靠性，并且从实验结果可以看出，随着发射点周围位置选取的数目 n 的增加，串行计算机的执行时间会快速增加，而并行计算机在采用主从模式下可以较好地减慢执行时间，随着 n 值的增加，会得到较好的加速比和并行效率，类似的并行计算方法可以应用于弹道解算的过程中，从而有效地减少弹道解算的时间，提高弹道解算的速率。

(下转第 230 页)