

基于 ITM 的复杂电磁环境并行计算方法

于荣欢¹, 吴玲达^{1,2}, 邓宝松³, 瞿 师²

(1. 装备学院重点实验室, 北京 101416; 2. 国防科学技术大学信息系统工程重点实验室
湖南长沙 410073; 3. 总后后勤科学研究所, 北京 100071)

摘要: 针对复杂电磁环境仿真中算法复杂、计算量大的特点, 构建了一种基于不规则地形模型 (irregular terrain model, ITM) 电波传播模型的复杂电磁环境并行计算方法。该方法采用三维标量场的数据组织方式描述复杂电磁环境。在并行计算关键的任务分配阶段依据 ITM 模型的计算特点和三维标量场的数据组织方式, 采用了以标量场列为基本单位的静态任务分配方法, 有效地避免了地形提取的冗余计算, 保证了节点间的负载均衡。经实验验证, 该算法并行效率较高, 能够有效地满足不规则地形条件下的复杂电磁环境快速计算的需要。

关键词: 并行计算; 电磁环境; 不规则地形模型; 负载均衡

中图分类号: TP 391

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.07.07

Parallel computing research of complex electromagnetic environment based on ITM

YU Rong-huan¹, WU Ling-da^{1,2}, DENG Bao-song³, QU Shi¹

(1. The Key Lab of the Academy of Equipment, Beijing 101416, China; 2. Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
3. Institute of Logistics Science of General Logistics Department, Beijing 100071, China)

Abstract: According to the large and complex computation of electromagnetic environment, a parallel computing method based on irregular terrain model (ITM) is proposed. This method captures the 3D scalar field to describe the electromagnetic environment and adopts a static task distribution algorithm based on row to avoid the redundancy of DEM computing, it can assure the load balance between computing nodes. The experiments show that this parallel method has high parallel efficiency and can suffice the need of electromagnetic environment computation effectively.

Keywords: parallel computing; electromagnetic environment; irregular terrain model (ITM); load balance

0 引言

近年来,随着现代战争的发展,战场电磁环境已经成为决定战场胜负的关键因素^[1]。战场电磁环境可以概括为作战双方在特定区域内,由使用各种电磁能的电子系统构成的信号特性和信号密度的总和^[2]。电磁环境的仿真越来越受到指挥人员和科研技术人员的关注,然而随着电磁设备的增多,电磁环境日益复杂,计算量日益增大,当前大部分的电磁环境仿真都存在效率低下的问题。

并行计算技术是解决大规模复杂数值计算的一种有效手段^[3]。目前在电磁环境并行计算领域,大部分都是针对小范围内信号级的电磁特性的并行计算研究^[4]。如利用并行快速多极子求解矩量法技术^[5-6],并行时域有限差分法和

并行有限元方法等^[7]。目前,对于大范围电磁环境的功能级并行仿真计算的研究还很少。

本文针对大范围复杂电磁环境的并行计算进行了深入的研究,提出了一种基于不规则地形模型 (irregular terrain model, ITM) 的复杂电磁环境快速并行计算与可视化方法。

1 基于 ITM 的复杂电磁环境计算模型

在复杂电磁环境中,电子设备通过发送和接收电磁信号来进行相互间的信号传输,电磁环境由大量辐射电磁信号构成,因此可以采用辐射信号功率强度的分布来表征电磁环境的特性。另外,由于受地形、大气等因素的影响,电磁波在空间传播时能量不可避免地会随着传播距离的增加

而逐渐衰减,电波传播模型是一种用于预测电磁波在空间传播衰减的计算模型,是电磁环境计算的基础,因此电磁环境可以通过各种电波传播模型来构建。所以,本文电磁环境并行计算的研究背景设定为在具有多辐射源的不规则地形三维空间中,某一频段内,电磁辐射信号功率强度的分布特性研究。

1.1 复杂电磁环境数据组织形式

基于三维标量场是科学计算可视化的一种重要数据组织形式。对于电磁环境这种充满于自然空间的三维连续场,采用三维标量场的数据组织形式可以很好的反映其物理特性。考虑到复杂电磁环境计算与分析的便利性,可以采用在笛卡儿坐标系三个坐标轴方向上均匀采样的方式,形成电磁环境三维标量场数据组织形式,其采样结果如图 1 所示。

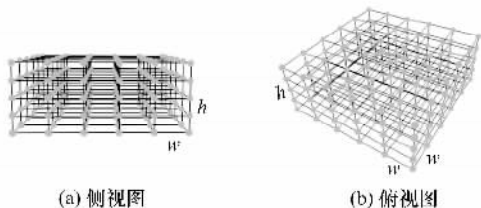


图 1 均匀标量场数据采样组织方式

图 1 中,在水平方向和垂直方向,可以根据实际情况,采用不同的采样步长 w 和 h 进行等距采样。

1.2 基于 ITM 的复杂电磁环境计算模型设计

在众多的电波传播模型中,ITM 是一种最常用的基于物理方法的模型^[8-9]。

ITM 在预测电波传播衰减时考虑了大气衍射、折射、对流层折射以及地形等因素,并且根据地形高程数据精度和计算速度的要求,提供了两点间和区域两种电波传播预测模式。

ITM 适用于天线高度在 0.5~3 000 m,频率在 20 MHz~20 GHz,电波传播距离在 2 000 km 内的情况^[10]。在 ITM 中,通常把电波传播衰减分成 3 个区域:视距区域、绕射区域、散射区域,如图 2 所示。

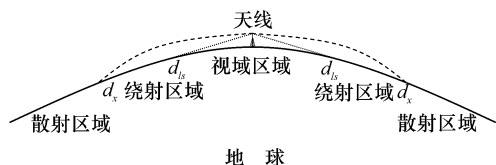


图 2 ITM 计算区域示意图

依据这 3 个区域,给出了考虑大气绕射、大气散射、地面反射等影响的电波传播损耗,其计算公式如下:

$$A_{ref} = \begin{cases} \max(0, A_{d1} + K_1 d + K_2 \ln(d/d_b)), & d \leq d_b \\ A_{d1} + m_d d, & d_b < d < d_x \\ A_{d3} + m_s d, & d \geq d_x \end{cases} \quad (1)$$

式中, A_{d1} 是一个考虑了大气、刃形衰减和地形遮挡等因素的电波传播损失值; d_b 是平坦球面视距距离; d_x 是散射区域计算起始距离; m_d 是表示在绕射区域内,衰减值与距离成线性关系; A_{d1} 是 A_{d1} 在 d_b 处的值; A_{d3} 是 A_{d1} 在 d_x 处的值; K_1 、 K_2 是在视距内插值控制系数; m_s 是在散射区域衰减值线性插值因子。

利用 ITM 所得电波传播损耗,同时考虑电波自由空间传播损失,电波传播总损耗 L 可写为

$$L = L_{fs} + A_{ref} \quad (2)$$

式中, L_{fs} 是电波自由空间传播损耗,其计算模型如下:

$$L_{fs} = 32.45 + 20 \lg f + 20 \lg R \quad (3)$$

式中, f 是电磁波的频率; R 是电磁波的传播路径长度。

在得到电波传播总损耗 L 之后,三维空间中任意一点的功率强度值可采用下面的公式得到

$$P_r = P_t + G - L - L_s \quad (4)$$

式中, P_r 是空间某点的辐射功率强度值; P_t 是用频设备发射的功率强度值; G 是天线增益; L 是由式(2)得到的电波传播损失值; L_s 是系统损耗,一般取 3~5 dB。

2 基于地形可重用分配的复杂电磁环境并行计算方法

在采用 ITM 对三维标量场中采样点辐射信号功率强度进行计算时,由于各采样点的辐射信号功率强度计算相对独立,因此在其并行化过程中可以较好地采用数据并行方式。在基于数据并行的并行计算算法中,如何在各计算节点间进行计算任务分配以达到各节点间的负载平衡是影响算法并行性能的关键,本文从 ITM 的计算模型出发,针对复杂电磁环境三维标量场的数据组织特点,提出了一种基于地形重用的通信电磁环境并行计算方法。

2.1 ITM 计算模型中的地形可重用性

ITM 中计算最复杂、计算量最大的部分是对电波传播损失值 A_{d1} 的计算,因此在 ITM 并行化过程中,重点考虑 A_{d1} 对并行计算的影响。

2.1.1 DEM 地形模型

数字高程模型(digital elevation model, DEM)是目前应用最广泛、最有效的一种对地球表面地形地貌的离散数字表达模型^[11]。DEM 有多种表示形式,主要包括规则网格(regular surface grid, RSG)模型和不规则三角网(triangulation)

lar irregular network, TIN) 模型。其中, RSG 是利用水平经纬方向上等间隔排列的地形点的高程来表示地形, 形成一个规则矩形网格的高程模型, 如图 3 所示。由于每一个网格点与其相邻网格点的拓扑关系隐含着该网格点的位置坐标, 因此在数据存储方面, 规则网格模型只需记录每个网格点的高程值, 及一个起始点的位置坐标和网格间距即可。

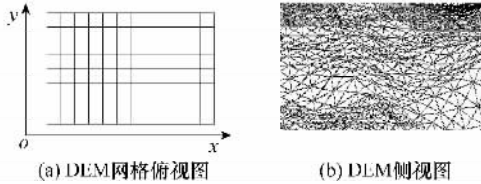


图 3 DEM 网格结构示意图

2.1.2 基于 DEM 的两点间地形提取

ITM 对 A_{ed} 的计算过程中, 考虑了地形因素对电波传播的影响, 需要从 DEM 中提取从辐射源到计算点之间的地形数据。图 4 为基于 DEM 的两点间地形提取示意图, 其中图 4(a) 为俯视图, 图 4(b) 为剖面视图。具体提取算法为, 从辐射源点 a 出发, 采用等距采样的方式在辐射源点 a 和计算点 b 之间进行采样, 为了保证采样精度, a 和 b 之间的采样间隔通常小于地形数据的采样间隔。 a 和 b 之间采样点的高程可以通过对与之相邻的 4 个 DEM 网格点进行双线性插值计算获得, 双线性插值计算过程如图 4(a) 所示, 先通过与 P_i 相邻的 4 个 DEM 网格点数据线性插值计算 C_1 和 C_2 两点的高程值, 然后再利用 C_1 和 C_2 进行线性插值得到采样点 P_i 的高程值。 两点间地形提取完成后, 再结合辐射点和计算点的高度 h_1 和 h_2 即可求得电波传播损失值 A_{ed} 。

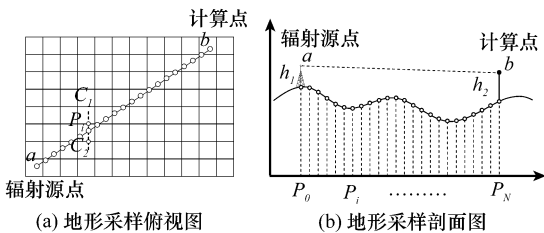
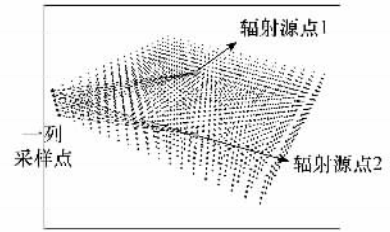


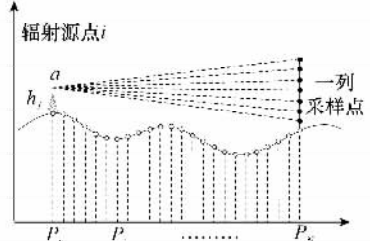
图 4 两点间地形提取示意图

2.1.3 地形可重用性

在通信电磁环境三维标量场中, 由于采用的是规则标量场, 每一列标量场采样点除了高度不一致外, 水平坐标是一样的, 因此在计算各辐射源对其的辐射信号功率强度时所需的地形提取是一样的, 所以对于三维标量场中的一列采样点来说, 计算任意一个辐射源对该列采样点的辐射信号功率强度时, 只需进行一次地形提取就可以了, 如图 5 所示。



(a) 单列采样点辐射功率强度计算立体示意图



(b) 单列采样点辐射功率强度计算侧视图

图 5 地形可重用性示意图

2.2 基于地形重用静态任务分配的并行计算方法

实际应用中, 研究的多辐射源通信电磁环境所涉及到的地理区域范围通常都比较大。对于大范围的 DEM 数据, 由于数据量较大, 通常采用分页、分块的方式存储, 因此在进行两点间地形提取时, 会消耗掉大量的地形检索时间。另外为了满足计算精度, 进行地形提取时采样间隔一般小于 DEM 的采样间隔, 计算点较远时会有大量的采样点产生, 而每个采样点都需进行双线性插值计算, 所以两点间地形提取时也会消耗掉大量的计算时间, 因此当计算地理区域范围较大时, 两点间地形提取的计算将会占到 ITM 总计算量的很大一部分。

由于三维标量场中同一列的标量场采样点计算时具有地形可重用的特点, 所以在三维标量场并行计算任务分配时, 为了尽可能地减少地形提取的次数和计算节点间的通信量, 采用以列为基本分配单元的方式进行静态任务分配, 具体分配过程如图 6 所示。

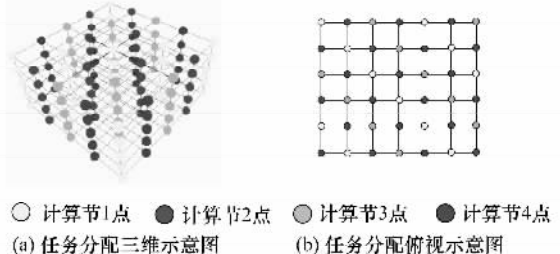


图 6 基于地形重用的 ITM 任务分配

其中, 同一灰色的采样点分配给了同一计算节点, 采用以列为基本分配单元的分配方式可以保证在并行计算中, 三维标量场同一列采样点分配给了同一计算节点, 该计算节点在计算某一辐射源对同一列采样点的辐射信号功率强度时只需进行一次地形提取计算即可, 这样就可以大大减

少 ITM 计算时的地形提取次数,提高并行算法的计算效率。

2.3 算法步骤

综上所述,本文采用的是一种数据并行的方式,根据之前所述基本原理,可得到基于 ITM 的并行计算方法具体步骤如下:

步骤 1 电磁环境计算范围确定,可以采用交互式的方法对需要进行电磁环境计算的范围进行计算;

步骤 2 对需要进行计算的电磁环境范围进行三维标量场的构建;

步骤 3 参考第 2.1 和 2.2 节的基本原理,采用基于地形重用的静态任务分配方法对三维标量场进行任务分配;

步骤 4 各并行计算节点采用 ITM 对所属三维标量场点的电磁辐射信号功率强度进行计算,在计算过程中对于同一列采样点均只提取一次地形值;

步骤 5 各并行计算节点在将所属任务计算完成后,将计算结果在统一的输出节点进行集成输出。

3 实验验证

为了验证本文算法的有效性,本文在银河 10 万亿次高性能仿真计算机上进行了仿真实验。银河高性能仿真计算机是新一代基于刀片式集群架构的高性能并行计算机系统,每一个集群节点都具有独立的计算与存储能力,各节点通过并行控制系统进行并行控制,是一个典型的多指令流多数据流(multiple instruction multiple data stream, MIMD)并行系统。

在此高性能仿真平台上,基于 MPICH2.0 并行计算开发环境对文中所述的复杂电磁环境并行计算算法进行了编码实现^[12-13]。并在此基础上,对不规则山地地形条件下多辐射源的辐射信号功率强度分布情况进行了并行计算,其中,三维标量场的采样规模为 256×256×128。其计算结果通过科学计算可视化方法在三维地理环境中的可视化效果如图 7 所示。

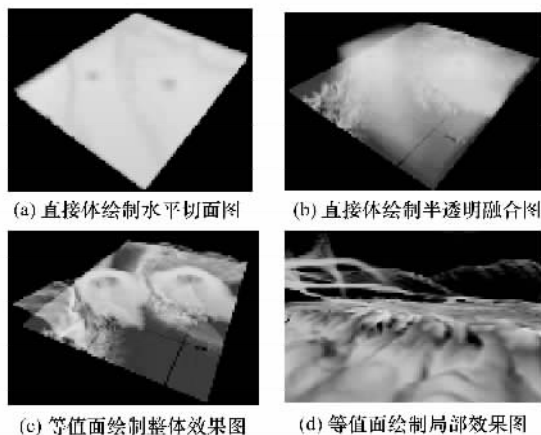


图 7 复杂电磁环境绘制效果图

图 7 中,不同的灰度表示不同的电磁辐射强度,灰度越深电磁辐射强度越强,其中图 7(a)和图 7(b)是直接体绘制效果图^[14],图 7(c)和图 7(d)是等值面绘制^[15]效果图,由图可以看到,山地中一共有两个主要的电磁辐射区域,如图 7(a)和图 7(b)中两个深色的区域所示。由图 7(c)和图 7(d)可以看到,由于 ITM 充分考虑了地形因素的影响,所以其与地形的匹配度也非常不错。

在同一集群试验系统,同一仿真场景条件下,采用不同的计算节点数,复杂电磁环境并行计算效率对比如表 1 所示。

表 1 不同节点条件下并行计算效率对比

计算节点数	计算时间/ms	加速比	加速效率/%
1	23 562	—	—
16	1 863	12.67	79.18
32	1 021	21.03	72.18
64	522	45.30	70.8
256	124	196.3	76.70

其中,加速比和加速效率计算公式如下:

$$\text{加速比} = \text{单节点时间} / \text{当前时间} \quad (5)$$

$$\text{加速效率} = \text{加速比} / \text{节点数} \quad (6)$$

表 1 中的计算时间仅为开始并行计算至最后一个计算节点完成计算的时间,不包括前期数据装载和并行计算结束后数据收集输出的时间。单节点计算时也考虑了地形重用的因素,逐列进行计算,每列只进行一次地形提取。由表 1 可以看到,由于三维标量场中各采样点的计算具有相对独立性,所以各个计算节点条件下的加速效率都比较高,基本都可以达到 70% 以上。

在同一集群试验系统,同一仿真场景中,对采用同一计算节点数(64 个计算节点)条件下,不同三维标量场采样密度的复杂电磁环境并行计算效率进行了对比实验,实验结果统计如表 2 所示。

表 2 不同采样密度条件下并行计算效率对比

采样密度	单节点计算时间/ms	64 节点并行计算时间/ms	加速比	加速效率/%
256×256×128	23 562	522	45.30	70.8
512×512×128	110 825	2 348	47.20	73.75
1 024×512×256	351 359	7 156	49.10	76.71
2 048×1 024×256	1 608 196	29 134	55.20	86.25
2 048×2 048×512	5 323 269	89 167	59.70	93.28

由表 2 可以看到,随着采样精度的增加,并行计算的加速效率逐渐上升。由这里也可以看到本文采用的并行计算方法具有较好的可扩展性。

另外,除了本文算法,还对不采用地形重用,而是直接按采样点次序进行顺序间隔任务分配的并行计算算法进行了编码实验,其并行计算效率与本文算法实验结果对比如

表 3 所示。

表 3 本文算法与顺序任务分配算法效率对比

计算节点数	本文算法 计算时间/ms	顺序任务分配 算法计算时间/ms
8	3 562	43 681
16	1 863	28 563
32	1 021	18 656
64	522	11 202
256	124	2 641

由表 3 可见,由于在并行计算过程中,采用顺序任务分配算法时,三维标量场中每一列采样点均进行了多次的重复地形采样,而地形采样计算在整个 ITM 计算过程的计算量中又占据了相当的比例,所以较之本文算法,采用顺序任务分配的并行计算方法消耗了成倍的计算时间。因此采用本文算法比采用一般的顺序任务分配算法有较大的效率优势。

4 结 论

本文针对复杂地形条件下,ITM 的计算特点,在三维标量场数据组织形式的基础上,构建了一个复杂电磁环境并行计算算法。该算法在关键的任务分配阶段依据 ITM 模型的计算特点和三维标量场的数据特点,采用了以标量场列为基本单位的任务分配方法,该分配方法避免了在同一列中对地形进行多次重复提取的冗余计算。实验表明,本文并行计算算法能够有效满足基于 ITM 复杂电磁环境快速计算的需要。

参考文献:

[1] 王汝群. 战场电磁环境[M]. 北京: 解放军出版社, 2006. (Wang R Q. *Battlefield electromagnetic environment* [M]. Beijing: China's People's Liberation Army Press, 2006.)

[2] 电磁干扰和电磁兼容性术语[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2002. (The technical expression of electromagnetic interference and electromagnetic compatibility[S]. Beijing: Military Standard Press of General Armament Department, 2002.)

[3] Flynn M J, Rudd K W. Parallel architectures[R]. *ACM Computing Surveys*, 1996, 28(1): 67 - 70.

[4] 潘小敏. 计算电磁学中的并行技术及应用[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2006. (Pan X M. *The Parallel technical and application in computation electro-magnetic* [D]. Beijing: Institute

of Electronics of Chinese Academy of Sciences, 2006.)

[5] Pan X M, Sheng X Q. A highly efficiently parallel approach of multi-level fast multipole algorithm[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2006, 20(8): 1081 - 1092.

[6] Chew W C, Jin J M, Michielssen E, et al. *Fast and efficient algorithms in computational electro-magnetics* [M]. Norwood: Artech House, 2001.

[7] Butrylo B W, Vollaire C, Nicolas L. Parallel implementation of the vector finite element and finite difference time domain methods[C]// *Proc. of the International Conference on Parallel Computing in Electrical Engineering*, 2002: 347 - 352.

[8] Hufford G A, Longley A G, Kissick W A. A guide to the use of the ITS irregular terrain model in the area prediction mode[R]. National Telecommunications and Information Administration, 1982: 82 - 100.

[9] Longley A G, Rice P L. Prediction of tropospheric radio transmission loss over irregular terrain, a computer method [EB/OL]. [2011 - 08 - 20]. http://www.its.bldrdoc.gov/pub/essa/essa_grl_79-its_67/.

[10] Hufford G. A. The ITS irregular terrain model, version 1. 2. 2, the algorithm[EB/OL]. [2011 - 08 - 20]. <http://flattop.its.bldrdoc.gov/itm.html>.

[11] 许妙忠. 虚拟现实三维地形建模和可视化技术及算法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2003. (Xu M Z. *Research on multi-resolution representation and visualization for terrain model in virtual reality* [D]. Wuhan: Wuhan University, 2003.)

[12] Gropp W, Lusk E. User's guide for mpich, a portable implementation of MPI[EB/OL]. [2011 - 08 - 20]. <http://www.mcs.anl.gov/research/projects/mpich2/documentation>.

[13] 张武生, 薛魏. MPI 并行程序设计实例教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. (Zhang W S, Xue W. *MPI parallel program examples course* [M]. Beijing: Tsinghua University, 2008.)

[14] Gobbetti E, Marton F, Guitian J A I. A single-pass GPU ray casting framework for interactive out-of-core rendering of massive volumetric datasets[C]// *Proc. of the Computer Graphic Interface*, 2008: 797 - 806.

[15] Thomas K, Simon S, Thomas E. Hardware-accelerated reconstruction of polygonal isosurfaces representation on unstructured grids[C]// *Proc. of the 12th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, 2004: 186 - 195.