

# 组网雷达探测能力的并行计算与可视化方法研究

于荣欢<sup>1</sup>, 吴玲达<sup>1,2</sup>, 瞿 师<sup>1</sup>

(1. 国防科学技术大学信息系统工程重点实验室, 湖南长沙 410073;

2. 装备指挥技术学院重点实验室, 北京 101416)

**摘要:** 深入研究了并行计算与并行绘制相结合的并行框架构建问题。针对组网雷达探测能力的计算与可视化特点, 在(PC)集群的基础上, 构建了一个并行计算与可视化运行框架。该框架在并行计算中, 采用八叉树分割的方法对组网雷达计算区域进行任务分配; 在并行绘制中, 采用 sort-last 的并行绘制机制。仿真试验结果表明, 该运行框架能够有效地满足大规模组网雷达探测能力计算与可视化的应用需要。

**关键词:** 组网雷达; 可视化; 并行计算; 并行绘制

**中图分类号:** TP 391

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.11.32

## Parallel computing and visualization method of radar net's detection ability

YU Rong-huan<sup>1</sup>, WU Ling-da<sup>1,2</sup>, QU Shi<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Science and Technology on Information Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. The Key Laboratory, Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)

**Abstract:** After researching the framework building of parallel computing and rendering and according to the character of radar net's detection ability, a framework of parallel computing and rendering based on PC cluster is proposed. In this framework, an octree is adopted to distribute the space of radar net in parallel computing, and a sort-last parallel mode is adopted in parallel rendering. The experiments show that this framework can satisfy the requirement of a large scale radar net effectively.

**Keywords:** radar net; visualization; parallel computing; parallel rendering

## 0 引言

雷达是现代战场上重要的情报信息获取手段, 随着反制手段的不断发展, 现代战争中单部雷达已经很难与其所面临的“四大威胁”(电子干扰、反辐射摧毁、隐身和低空突防)相抗衡<sup>[1]</sup>; 正是在这种情况下, 雷达组网技术应运而生, 且随着技术的不断发展与完善, 已成为预警探测技术未来的一个重要发展方向。

组网雷达是指通过将多部不同体制、不同频段、不同程式(工作模式)、不同极化方式的雷达或者无源侦察装备适当布站, 借助于通信手段链接成网, 由中心站统一调配而形成的一个有机整体, 如图 1 所示。

组网雷达中, 不同的雷达可以从不同的方向对目标进行探测和跟踪, 并把各雷达站获得的目标信息(原始信号、点迹、航迹等)实时传递给控制中心站, 中心站对目标信息进行综合处理后形成雷达网覆盖范围内的情报信息, 并按照战场态势的发展自适应的调整网内各雷达的工作状态,

发挥各个雷达和雷达对抗侦察装备的优势, 从而完成整个覆盖范围内的探测、定位和跟踪任务。

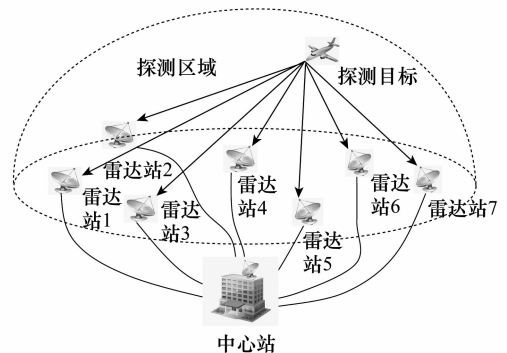


图 1 雷达组网示意图

如何更加有效的对组网雷达探测能力进行描述, 是雷达组网技术的一个重要研究内容。目前, 大多数的组网雷达探测能力可视化方法都是针对某一高度层的二维可视化

收稿日期: 2011-03-11; 修回日期: 2011-06-27。

基金项目: “十二五”装备预先研究基金资助课题

作者简介: 于荣欢(1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为多媒体信息系统与虚拟现实技术。E-mail: yrh1983@163.com

方法;这种二维的可视化方法很难对雷达组网的整体探测范围进行描述。在雷达组网能力三维可视化方面,目前国内研究的并不多,文献[2-3]在地理信息系统(geographic information system, GIS)上采用叠加不同高度的二维雷达探测范围图构建三维雷达探测范围,国防科技大学陈鹏等人提出了基于等值面提取的雷达探测范围模型生成表现方法<sup>[4]</sup>,这些三维可视化方法大部分都是针对单部雷达的,对于雷达组网系统能力的三维可视化研究的还比较少。

大范围组网雷达探测能力的计算与三维可视化,考虑地形、气象等环境因素,其计算量和绘制量都是巨大的;为了满足战场指挥员的实时需要,必须尽量提高组网雷达探测能力的计算效率和绘制效率,已有的单个人计算机(personal computer, PC)的加速算法如模型简化算法和基于图形处理器(graphic processing unit, GPU)的加速算法<sup>[5-6]</sup>虽然能够大规模提高计算效率与绘制效率,但是毕竟单 PC 的资源是有限的,随着战场规模的进一步扩大,组网雷达的增多以及对计算精度要求的增加,单 PC 的计算与绘制能力还是远不能达到实际应用的需要。因此,必须考虑采用并行计算与绘制技术。本文针对组网雷达探测能力的特点,提出了一个基于计算集群系统的组网雷达探测能力并行计算与绘制框架,并对并行计算与绘制算法中的一些关键性问题和难点问题进行了研究。

## 1 组网雷达探测能力计算模型

Marcum 和 Swerling 在研究了雷达在一定的累积脉冲数  $N_p$  和目标雷达横截面(radar cross-section, RCS)起伏模型的情况下,根据信噪比 SNR 和虚警概率  $P_f$  得到单部雷达探测概率的计算方法<sup>[7]</sup>。其中 Marcum 模型(稳定目标)的雷达探测概率为

$$P_d = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \sqrt{-0.8 \ln [4P_f(1-P_f)]} + \sqrt{\frac{N_p}{2} - \frac{1}{2} - \sqrt{N_p \operatorname{SNR} + \frac{N_p}{2} - \frac{1}{2}}} \right\} \quad (1)$$

式中,  $\operatorname{erfc}(x)$  是余误差函数,  $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt$ 。

Swerling 模型(起伏目标)的雷达探测概率为

$$P_d = K_m \left[ \frac{K_m^{-1}(P_f, 2N_p) - 2(N_p - n_e)}{\frac{N_p}{n_e} \operatorname{SNR} + 1}, 2n_e \right] \quad (2)$$

式中

$$n_e = \begin{cases} 1, & \text{目标为 Swerling I} \\ N_p, & \text{目标为 Swerling II} \\ 2, & \text{目标为 Swerling III} \\ 2N_p, & \text{目标为 Swerling IV} \end{cases}$$

$$K_m(x, d) = 1 - P\left(\frac{d}{2}, \frac{x}{2}\right), P(\alpha, x) = \frac{\int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt}{\int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt}$$

对于组网雷达,三维空间中某点的探测能力不能简单地通过单部雷达的信噪比叠加来描述。在组网雷达联合探

测模型构建中,对于不同的雷达组网检测结构,对应有不同的检测融合模型,比如观测融合、决策融合、概率融合、决策-概率融合等。本文采用按照秩 1 准则由单部雷达探测概率合成雷达网联合探测概率的方法,其计算公式设计为

$$P_d = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{d_i}) \quad (3)$$

式中,  $N$  为组网雷达数;  $i$  表示第  $i$  部雷达;  $P_{d_i}$  为第  $i$  部雷达探测同一目标的探测概率。由式(3)可见,组网后系统对目标的联合探测概率明显高于单部雷达的探测概率。

要对三维空间中组网雷达的联合探测能力进行综合分析,就必须对三维空间中各位置点的组网雷达联合探测概率进行计算,由于三维空间的连续性,不可能对所有位置的探测概率进行计算,所以采用在三个维度上等距采样的方式对计算区域内的组网雷达探测能力进行计算,如图 2 所示。

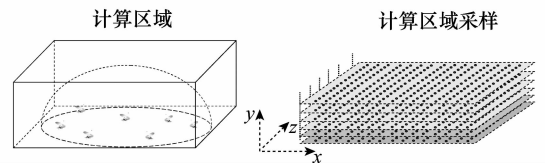


图 2 组网雷达计算区域选取与采样示意图

图 2 中左边为需要进行组网雷达能力计算的区域,右边为三维度上等距采样结果;由联合探测概率式(3)可知,区域中某采样点的联合探测概率计算复杂度与组网雷达的个数有关,因此,某一区域的组网雷达探测能力计算具有  $O^1$  的计算复杂度。

## 2 组网雷达探测能力并行计算与绘制框架设计

在现代战争中,随着雷达探测能力的增加,组网雷达覆盖范围不断扩大,组网雷达个数与种类日益增多,且由上节可知,联合探测能力计算具有  $O^1$  的计算复杂度,因此随着采样精度和雷达个数的增加,单 PC 的计算与绘制能力远不能达到实际应用的需要,所以,为了满足战场指挥员的实时需要,必须摆脱传统单 PC 的运行模式,采用并行计算与绘制的方式。

### 2.1 组网雷达探测能力并行算法设计

所谓并行计算就是利用多处理器或多计算机,将进程相对独立地分配于不同的节点上,由各节点独立的操作系统调度的计算模式。并行计算中各节点享有独立的中央处理器(central processing unit, CPU)和内存资源(内存可以共享),进程间通过消息传递信息。

由组网雷达联合探测能力计算模型可见,在联合探测概率数值计算过程中,各采样点之间都是相对计算独立的;因此联合探测概率数值计算具有较好的可并行性。在组网雷达联合探测能力计算模型并行化过程中,可以不对计算模型作较大改动,直接将其应用到并行计算之中。

任务分配是并行计算算法的基础与先决条件,任务分配后各节点负载均衡的优劣将直接影响并行计算算法的性能。本文采用八叉树分割法对计算任务进行等块划分,如图 3 所示。

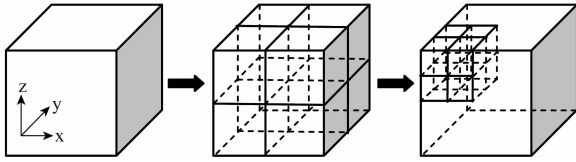


图 3 空间八叉树分割示意图

负载均衡满足水桶原理,即并行系统的性能由系统中负载最重的节点决定;由于地形起伏、气象以及子雷达等分布的不均匀,各采样点的联合概率计算复杂度是非均匀分布的,为使各节点的计算量尽量达到平衡,需考虑计算量在各计算节点之间的合理分配。基于八叉树分割的特点,本文将拟将八叉树的叶子节点按照先序遍历的方式依次循环的分配给各计算节点,如图 4 所示。

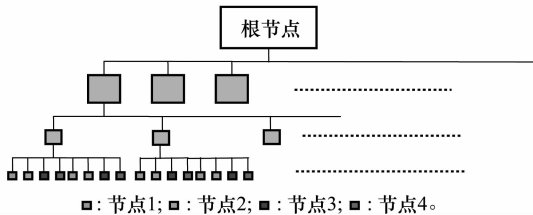


图 4 基于八叉树的计算区域任务分配

采用叶子节点依次循环的分配方式可以保证无论场景气象、地形的复杂度以及雷达的分布如何变化,都可以保证各计算节点尽量达到负载均衡;当然剖分粒度越细,负载均衡越好,但同时也增加了任务分配的计算量和网络的通讯量。图 5 为三维计算区域分配结果图。

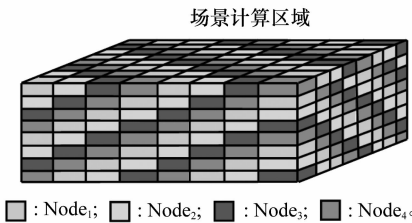


图 5 场景计算区域任务分配图

同一种颜色被分配到相同的计算节点,由图 5 可见,每个计算节点所包含的分割区域都均匀的分配到了计算区域的各个部分,所以当分割层次够细时,无论地形起伏、气象以及组网雷达中雷达分布有多不均匀,各计算节点的任务分配都是相对均匀的。

各计算节点在将本节点计算任务完成后转入并行绘制阶段。

### 2.2 组网雷达探测能力并行绘制机制设计

对于上面联合探测概率采样计算结果这类三维空间数据场,其可视化方法大致主要分为两大类:面绘制和直接体绘制。面绘制适用于绘制表面特征分明的数据场(如组织和器官),对过渡平缓的体数据绘制效果不佳。而且面绘制只能显示物质的轮廓信息,内部信息无法保留,所以本文采用光线投射(ray casting, RC)直接体绘制方法,基本原理是沿着视点位置发射射线,在图像空间的每个像素上累积射

线在三维体数据中采样点的颜色值,得到最终的图像<sup>[8-9]</sup>,如图 6 所示。

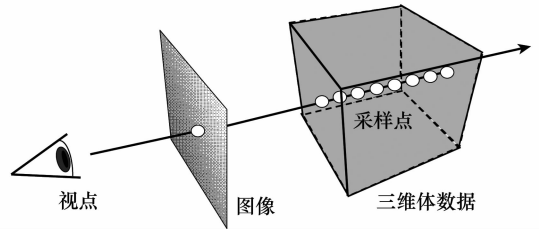


图 6 基于光线投射的直接体绘制

随着组网雷达规模的扩大,生成体数据的分辨率和规模越来越大。这为体绘制技术带来很多新的挑战。因为单台 PC 机无论是存储还是绘制速度上都无法满足大规模数据的体绘制要求。为了解决这一问题,本文采用并行体绘制技术。

如何合理的将体绘制过程并行化是并行体绘制技术的一个关键性问题,为解决这一问题,首先必须分别对并行模式、任务分配、场景合成问题进行深入的研究。

并行模式的选取是并行体绘制的关键;并行绘制技术的基础是绘制流水线内在的可并行性,理论上,将多条绘制流水线并列运行就可以实现并行绘制系统。Molnar 等人根据并行图形绘制任务划分的阶段与典型图形流水线的关系,按照场景数据归属判断(sorting)的时机,将并行图形绘制系统划分为 sort-first、sort-middle 和 sort-last 3 种<sup>[10]</sup>,其中 sort-first 并行图形绘制系统是在几何处理器(G)之前按屏幕划分进行场景数据的归属判断,sort-middle 系统在几何处理器之后,光栅化处理器(R)之前进行,sort-last 系统在光栅化处理器之后进行。由于在上一节并行计算过程中已经将计算区域按等八叉树分割进行了任务分配,所以为了减少不必要的通信消耗,在并行绘制阶段本文采用 sort-last 并行绘制机制。其并行绘制过程如图 7 所示。

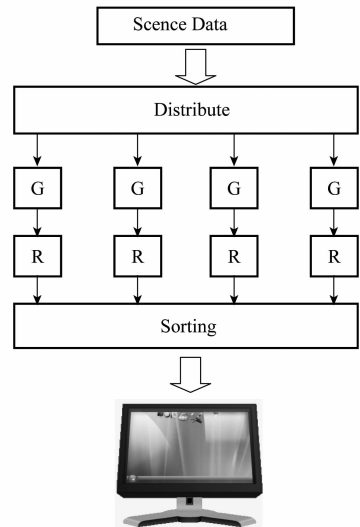


图 7 Sort-last 并行绘制机制

在 sort-last 并行绘制机制中,任务分配和场景合成是影响并行性能的关键;由于在并行计算过程已对计算区域进行了任务分配,为避免再次分配,本文将计算单元与绘制单元

合并在同一节点上,节点绘制体元由该节点计算结果直接绘制得到;由于 sort-last 并行模式依据场景内容进行任务分配,各绘制节点的绘制内容在屏幕上的分布均不确定,所以,场景合成采用全屏幕深度合成方式<sup>[11]</sup>,如图 8 所示。

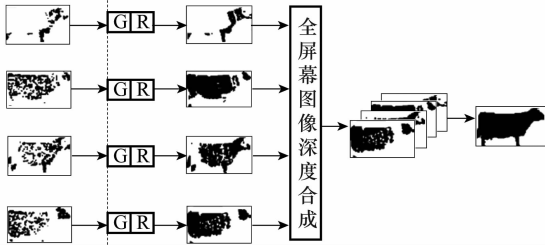


图 8 全屏幕深度合成

在全屏幕深度合成中每个绘制节点根据绘制任务负责整个显示屏幕大小图像的绘制,然后再根据它们的深度信息进行全屏幕深度合成得到最终显示图像;

### 2.3 基于 PC 集群的并行计算与绘制框架设计

并行运行硬件环境是并行计算与绘制的硬件基础,综合考虑效率、可行性和成本等因素,本文拟采用计算机集群(cluster)作为并行计算与绘制的基础平台;所谓计算机集群技术就是将若干台 PC 机通过高速网络连接在一起,使其像一台计算机一样工作,从而获得接近于超级并行计算机的处理能力的技术<sup>[12-13]</sup>。在现有的硬件条件下,如何构建一个适合于组网雷达探测能力并行计算与绘制的计算机集群系统是本文研究的一个重要内容;本文采用的集群系统结构如图 9 所示。

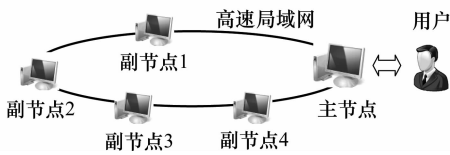


图 9 PC 集群并行硬件环境构架

该集群系统由一个主节点和若干个副节点组成,各个节点之间通过高速局域网相连;其中,主节点除了兼负一个副节点的功能外主要负责场景控制、任务分配、数据分发,并行控制和场景合成等工作;副节点主要负责分配区域的组网雷达联合概率计算、分配区域的直接体绘制、帧缓冲数据的组织与传送等。

除了硬件环境,工作框架设计也是组网雷达探测能力并行计算与绘制系统性能优劣的关键,结合组网雷达探测能力计算与绘制的特点,并行计算与绘制工作框架设计如图 10 所示。

其中,基础数据包括基础地理环境数据、气象环境数据、组网雷达配置和组网雷达探测能力计算模型;任务分配模块配置在主节点;初始时,基础数据存储在主节点之中;实际操作过程中,为了减少网络传输量,运行前,将基础数据预先拷贝到各节点中,运行时,任务分配模块仅需将分配区域包围盒传入各节点中,大大减少了网络传输,提高了系统性能。运行过程中,主节点利用数据分发模块和并行控

制模块对系统进行并行控制,实时地将视点信息、场景控制信息、环境变化信息等传入各副节点;各节点根据传入数据,对其所分区域各采样点联合探测概率进行计算;计算完成后,各节点利用直接体绘制将所属区域场景渲染到各节点的帧缓冲中。然后将各子节点生成的图像与深度信息进行逐级合成。最后合成场景图像通过主节点进行屏幕输出。

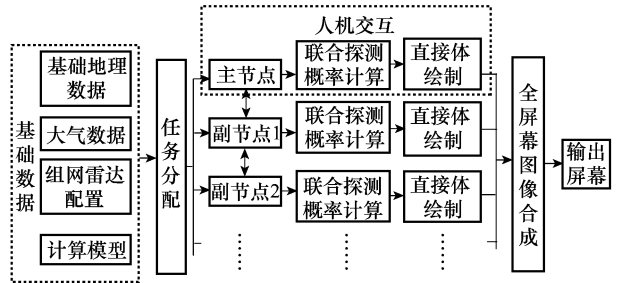


图 10 并行计算与绘制工作框架

## 3 试验验证

为了验证本文算法的有效性,基于千兆局域网,构建了具有四个绘制节点的计算机集群试验系统;各绘制节点主要硬件配置为:CPU Intel Core 2, 4 GHz;内存 2 G;显卡: Nvidia Geforce 5800GT;

在此集群试验系统基础上,采用 Equalizer 并行图形绘制开发包对文中算法进行了编码实现<sup>[14-15]</sup>,构建了组网雷达探测能力并行计算与绘制原形系统,其并行计算绘制效果如图 11 所示。

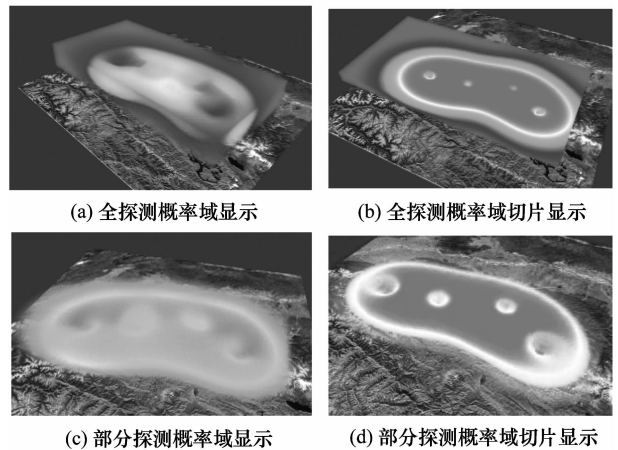


图 11 组网雷达探测能力并行计算与绘制效果图

图 11 为某一山地地形上,4 台防空雷达组网探测能力的仿真计算与显示,不同的颜色表示不同的组网联合探测概率;其中图 11(a)和图 11(b)两幅图为全探测概率值域的显示,图 11(c)和图 11(d)为探测概率大于某一阈值的组网雷达探测能力显示;图 11(a)和图 11(c)为全计算区域的探测能力显示,图 11(b)和图 11(d)为某一高度的切片显示。

对于上面同一场景,在不同的采样精度下,单机运行与 4 台 PC 集群运行的绘制效率比较如表 1 所示。

表 1 单机与集群绘制效率比较

采样精度	单机运行 帧率(帧/秒)	PC 集群运行 帧率(帧/秒)	加速效率
8×8×8	94	152	40.4%
16×16×16	46	121	65.7%
32×32×32	12	38	79.1%
64×64×64	4	15.6	97.5%

表 1 中,加速效率计算公式为

$$\text{加速效率} = \text{加速比} / \text{节点数} \quad (4)$$

$$\text{加速比} = \text{集群帧率} / \text{单机帧率} \quad (5)$$

由表 1 可以看到,随着采样精度的不断加大,虽然单机和 PC 集群的运行帧率均急剧减小,但是 PC 集群的加速效率却是逐渐增加的,因此当雷达组网规模和采样精度进一步增加时,只需要扩大 PC 集群的规模就能满足实时计算与绘制的需要了。

为了分析并行计算与绘制中各阶段对并行效率的影响程度,在上面实验过程中,对各阶段的时间消耗比例进行了统计,其平均统计结果如表 2 所示。

表 2 并行计算与绘制各阶段时间消耗比例

采样精度	分配/%	计算/%	绘制/%	图像合成/%
8×8×8	1	16	20	63
16×16×16	2	26	23	49
32×32×32	2	34	28	36
64×64×64	3	53	31	13

由于节点间通信绝大部分发生在图像合成阶段,所以,通信消耗主要包含在图像合成过程中。由表 2 可以看到,对于不同的采样精度,各阶段的消耗比例各不相同,由于图像合成采用全屏幕深度合成的方式,其绝对时间消耗始终保持不变,所以随着采样精度的增加,其所占比率逐次下降,这也是表 1 中加速效率会随着采样精度逐渐增加的主要原因。

为了对算法中并行计算和并行绘制的独立运行效率进行分析,在采样精度为 32×32×32 基础上,分别对并行计算和并行绘制在 1~4 个节点上的加速比进行了统计,统计结果如图 12 所示。

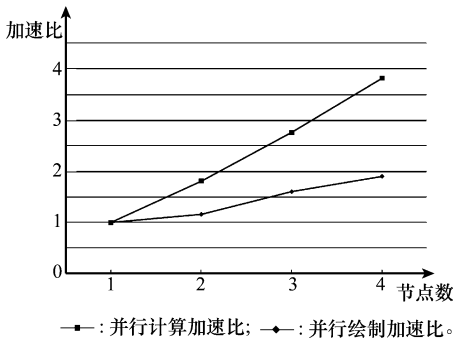


图 12 并行计算与并行绘制加速比统计图

由图 12 可见,对于并行计算,由于基本没有通信消耗,所以其加速比很高,接近线性加速;而并行绘制由于通信消耗和图像合成消耗均很大,所以其加速比较低,加速性能不高。

### 4 结 论

本文针对大规模组网雷达探测能力单 PC 计算与可视化能力不足的问题,在 PC 集群的基础上,提出了一种适用

于组网雷达探测能力并行计算与可视化的运行框架。在并行计算中,针对组网雷达计算区域采样的特点,采用直接八叉树分割的方法对计算区域进行任务分配;在并行绘制中,对应于并行计算的任务分配模式,采用 sort-last 的并行绘制机制。该运行框架在 4 节点的计算机集群系统上进行了编码实验,试验结果表明该运行框架能够有效的满足大规模组网雷达探测能力计算与可视化的应用需要。

### 参考文献:

- [1] 陈军,冯卫强,赵虎强. 防空组网雷达“四抗”能力综合评估[J]. 指挥控制与仿真,2009,31(2):62-64,76. (Chen J, Feng W Q, Zhao H Q. General four resist ability evaluation of air defense radar net[J]. *Command Control & Simulation*, 2009, 31(2): 62-64,76.)
- [2] Rancić D, Dimitrijević A, Milosavljević A, et al. Virtual GIS for prediction and visualization of radar coverage[C]// *Proc. of the Visualization, Imaging, and Image Processing*, 2003:396-403.
- [3] Kostić A, Rancić D. Radar coverage analysis in virtual GIS environment[C]// *Proc. of the International Conference on Telecommunications in Modern Satellite*, 2003:721-724.
- [4] 陈鹏. 虚拟战场环境中雷达作用范围表现技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007. (Chen P. Research on representation of radar coverage in virtual battlefield environment[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.)
- [5] Kruger J, Westermann R. Acceleration techniques for GPU-based volume rendering[C]// *Proc. of the IEEE Visualization*, 2003:287-292.
- [6] Owens D J, Houston M, Luebke D, et al. GPU computing: graphics proceeding units-powerful, programmable and highly parallel-are increasingly targeting general-purpose computing applications[J]. *Proceeding of the IEEE*, 2008,96(5):879-899.
- [7] Skolnik M I. *Radar handbook*[M]. 3rd ed. McGraw-Hill, 2008:30-35.
- [8] Gobbetti E, Marton F, Guitian I A. A single-pass GPU ray casting framework for interactive out-of-core rendering of massive volumetric datasets[J]. *The Visual Computer*, 2008,24(7):797-806.
- [9] Ament M, Weiskopf D. Direct interval volume visualization[J]. *IEEE Trans. on Visualization And Computer Graphics*, 2010, 16(6):1505-1514.
- [10] Molnar S, Michael C, Ellsworth D, et al. A sorting classification of parallel rendering[J]. *IEEE Computer Graph and Application*, 1994:23-31.
- [11] 石教英,金哲凡. 并行多边形绘制技术综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003,15(6):637-642. (Shi J Y, Jin Z F. A survey on parallel polygon rendering[J]. *Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics*, 2003,15(6):637-642.)
- [12] Chandrajit B, Sangmin P. Parallel multi-PC volume rendering system[R]. CS and ICES Technical Report, 2005.
- [13] Luciano P S, Raffin B, Joaquim A J. PC clusters for virtual reality[J]. *The International Journal of Virtual Reality*, 2008,7(1):67-80.
- [14] Eilemann S. *Equalizer 0.9 programming and user guide*[M]. Eyescale Software GmbH, 2009.
- [15] Eilemann S. Equalizer: A scalable parallel rendering framework[J]. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 2009, 15(3):436-452.