

# 基于 CUDA 的电磁场快速体绘制研究

张文波<sup>1</sup> 曹耀钦<sup>1</sup> 孙伟<sup>2,3</sup> 王连锋<sup>1</sup>

(第二炮兵工程大学 西安 710025)<sup>1</sup>

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 成都 610059)<sup>2</sup>

(西北综合勘察设计院 西安 710003)<sup>3</sup>

**摘要** 电磁场数据的生成和体绘制是密集型计算,且十分耗时。为了实现数据的快速生成,提出基于 CUDA 加速的电磁场数据计算框架,亦即将大量的传播模型计算移植到 GPU 中。同时,为了达到可交互性,将光线投射算法移植到 GPU 上执行。鉴于电磁场数据的特点,提出相交投影的概念,并利用其判断光线与数据场的相交情况。仿真结果显示,基于 CUDA 的数据生成可以达到 158 的加速比,光线投射算法也能以高达 63 的帧速进行绘制,满足了实时性和交互性要求。

**关键词** 电磁场绘制, CUDA, ITM 模型, 体绘制

中图分类号 TP391 文献标识码 A

## Electromagnetic Field Volume Rendering Based on CUDA

ZHANG Wen-bo<sup>1</sup> CAO Yao-qin<sup>1</sup> SUN Wei<sup>2,3</sup> WANG Lian-feng<sup>1</sup>

(Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)<sup>1</sup>

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)<sup>2</sup>

(Northwest Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an 710003, China)<sup>3</sup>

**Abstract** Electromagnetic field data generation and volume rendering are dense computation and time-consuming on CPU. To meet the requirements of rapid computation, the CUDA-based architecture of electromagnetic field data generation and ray casting rendering algorithm were designed respectively for GPU's highly parallel ability. Considering of the characteristics of electromagnetic field data, a method to judge ray and data intersection was presented which utilizes 3D data's projection on detector along view direction. Simulation test results show that data generation on GPU can achieve a speedup of 158 than on CPU, and ray casting algorithm renders in high FPS perfectly.

**Keywords** Electromagnetic field visualization, CUDA, ITM model, Volume rendering

## 1 引言

电磁波是各种信息的重要媒介和最佳载体,不同电磁设备发射的电磁波形成了不同规模的电磁环境,并在各种人类活动中产生了重大影响。随着部队信息化建设的不断推进,高度电子化的武器装备不断增多,特别是大功率、高频谱电子对抗装备的大规模使用,使得电磁信号环境日益密集化、复杂化,进而形成了复杂的战场电磁环境,并在一定程度上对整个战场的胜负起着决定性作用。然而,电磁场“看不见”、“摸不着”的特性使得指挥员和作战人员在难以捉摸对方攻击手段的同时也无法得知己方的攻击效果。通过科学计算可视化技术将电磁场显示出来,是感知电磁环境的直观且有效的方式。

## 2 相关研究

电磁场的可视化研究最早可以追溯到雷达刚刚出现,

Blake 等将雷达的距离性能以图形图像的方式表现出来<sup>[1]</sup>。此后,大量学者研究了雷达作用范围在二维、三维上的表现。成柏林<sup>[2]</sup>在 C 语言下实现了雷达在有源和无源干扰条件下的雷达探测范围在二维和三维上的可视化表现,并可进行人机交互。林卫明<sup>[3]</sup>、Rančić D<sup>[4]</sup>和 Kostić A<sup>[5]</sup>均从雷达方程出发研究雷达探测范围的可视化,后者还结合 GIS 研究了雷达探测范围受地形的影响。早期的电磁场可视化绘制研究的主要是雷达探测范围在二维平面上显示,限于当时计算机和图形硬件发展水平的制约,电磁场的三维绘制非常慢。周桥<sup>[6]</sup>研究了无线通信设备的电磁环境三维可视化绘制,采用面绘制、切片绘制和直接体绘制实现了电磁场的绘制,具有很好的可视化效果,但是其方法没有进行优化,在绘制数据量变大时,绘制的实时性有待提高。陈鹏<sup>[7]</sup>则利用硬件加速了雷达波损失三维数据场的等值面抽取,克服了二维表现不直观和三维再现慢的缺点,虽然实现了 2 倍多的加速比,但加速效

到稿日期:2012-12-15 返修日期:2013-03-26 本文受国家自然科学基金项目(61132008)资助。

张文波(1983—),男,博士生,主要研究方向为电磁环境仿真和智能计算, E-mail: zippybo@163.com; 曹耀钦(1962—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机网络与分布计算; 孙伟(1980—),女,博士生,主要研究方向为岩土工程与科学计算可视化; 王连锋(1985—),男,博士生,主要研究方向为路径规划。

果依然不理想。杨超<sup>[8,9]</sup>在提取电磁场等值面时,利用图像硬件 GPU 的加速功能实现了多层等值面的融合绘制,其基本达到了实时性要求。但由于数据场是预先通过电波传播模型生成的,在绘制时如果改变电磁设备的参数,则数据需要重新生成,耗时达到 8.836s,无法实现实时性。因此,电磁场数据的快速生成也是需要解决的问题。

GPU(Graphics Processing Unit)强大的并行计算能力正在向通用计算 GPGPU(General Purpose GPU)发展,但 GPU 图形管线编程模式的复杂性限制了它的应用。随着易于理解和使用的 CUDA(Compute Unified Equip Architecture)计算架构的出现,GPGPU 开始逐渐大量应用。在 CUDA 中以 Grid、Block、Thread 三层线程结构运行,并将 GPU 视为可以并行运行大量计算线程的设备,鉴于此,本文提出将电磁场数据的生成和绘制移植到 GPU 中,以 CUDA 的大量并行线程加速电磁场的绘制速度。

### 3 基于 CUDA 的电磁场数据生成

电磁场数据是实现电磁场可视化的基础,其生成速度和精度直接影响着可视化的速度和效果。ITM 模型(Irregular Terrain Model)能够在大范围且不规则地形上高效地预测电波传播衰减,在获取发射点和接收点间的地形剖面高程数据后,通过式(1)的点ToPoint模式可以较准确地得到两点之间的电波传播情况。

$$A_{ref} = \begin{cases} \max(0, A_e + K_1 d + K_2 \lg d), & d_{\min} \leq d \leq d_{IS} \\ A_d + m_d d, & d_{IS} \leq d \leq d_x \\ A_s + m_s d, & d_x \leq d \end{cases} \quad (1)$$

式(1)是传输损耗参考中值的计算公式,可以分别计算视距传播损耗、衍射传播损耗和散射传播损耗,式(1)的具体推导细节可参考文献[10,11]。同时,再考虑到自由空间传播损耗,整个传播路径上的总体损耗为:

$$L_p = A_{ref} + L_{free} \quad (2)$$

其中,自由空间传播损耗  $L_{free} = 32.45 + 20 \lg d + 20 \lg f$ ,  $d$  为传播距离,单位为 km,  $f$  为电波频率,单位为 MHz。

在电波衰减计算时,如果采用  $90m \times 90m$  SRTM<sup>[12]</sup>(Shutter Radar Topography Mission)DEM 高程数据,以辐射源为中心,采样点间隔为 270m,计算  $10km \times 10km \times 10km$  范围内的电磁场数据时,需要计算的衰减值会有 54,872 个,而当计算  $30km \times 30km \times 30km$  范围内的电磁场数据时,需要计算的衰减值将达到 1,404,928 个,即使采用文献[13]中的简化模型,计算时间依然会达到十几秒之多,无法实时性地生成,而且随着计算半径的增大,计算时间也将成倍地增长。

在对 ITM 模型简化之后,从该模型的算法层面已无太大的加速潜力可供挖掘,而且从式(1)和式(2)中可以看出,每一个接收点处的传播衰减值计算相互独立,不存在依存关系,这样就可以充分利用 GPU 的大规模并行计算能力来完成大量电磁场数据的计算。为此,结合多核 CPU 和 GPU 各自的优势,设计了基于 CUDA 的电磁数据计算框架,在多核 CPU 的协同之下实现电磁场数据的大量、快速生成,如图 1 所示。

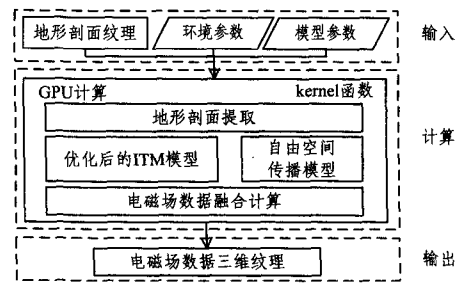


图 1 基于 CUDA 的电磁场数据计算框架

图 1 的计算框架分为 3 个部分:数据输入、数据计算、数据输出。在输入部分,ITM 模型所需的地形剖面数据在 CPU 中组织成二维地形纹理,然后载入到 GPU 中支持缓存的纹理存储器中,以获得较高的访问速度;环境参数和模型参数主要包括电磁设备的类型、频率、天线参数、地表的电导率、介电常数和大气参数等,数据量较少,可以存放于拥有高速缓存器的共享存储器中,以达到与访问寄存器相近的速度。计算部分是 CUDA 架构中的 kernel 函数,由 4 个 kernel 子函数组成,首先通过地形剖面提取在地形纹理中得到的两点之间的高程,再使用优化后的 ITM 模型和自由空间传播模型计算传播损耗,最终融合计算出所需的具体电磁场数据。输出部分将计算部分得到的电磁场数据存储为三维纹理的形式提供给后续的可视化绘制算法。以上计算框架的具体计算流程如图 2 所示。

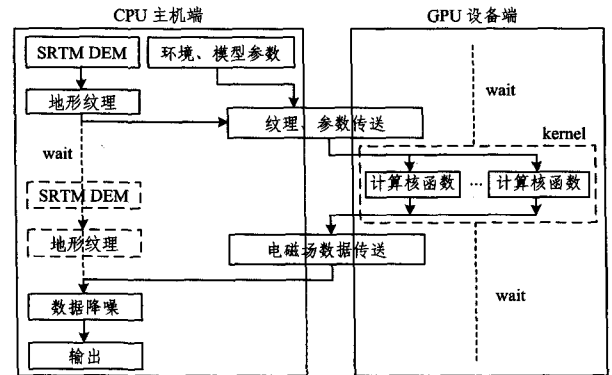


图 2 电磁场数据计算流程图

在基于 CUDA 的实现中分为 CPU 主机端和 GPU 设备端两部分。

主机端运行在 CPU 线程中,读取电磁数据计算所需的各个参数(频率  $f$ 、天线极化方向、收发天线高度  $hR$  和  $hT$ 、地球折射率  $N_s$ 、地面电导率  $\sigma$ 、介电常数  $\epsilon_r$  和气候参数)和 SRTM 高程数据。为了减少等待时间,SRTM 数据可以提前载入内存并转换为纹理形式,同时为了减少 GPU 计算等待 CPU 读取数据的时间,可以应用 OpenMP 技术根据多核处理器中核心的数量生成相同数量的线程,每个线程用于读取一个电磁设备需要的地形剖面区域数据。当主机端接收到设备端传回的数据纹理后还要对其作降噪处理,以去除其中的异常点。

设备端 kernel 由主机端线程调用,而在调用 kernel 函数之前需要进行线程的分配。合理的线程分配可以最大限度地利用 GPU 内的资源来提高计算效率。

地形纹理、环境和模型参数、电磁场数据纹理通过 CU-

DA的数据传送机制传送。

#### 4 基于 CUDA 的电磁场数据绘制

光线投射算法是三维数据场直接体绘制算法中使用最为广泛的算法,一般需要执行以下步骤:数据输入与处理,光线生成与采样,色彩、光照与透明度计算等。

目前,已有基于 CUDA 的光线投射算法<sup>[4]</sup>的研究,还要判断光线与数据场的交点,或者构建一个包围盒来判断光线与包围盒的相交情况。这部分工作是由每条光线在其生成之后,采样之前完成。然而,在电磁场的绘制时,电磁场数据是在正方体中逐点采样得到的,体素分布均匀。当光线从视点出发,穿过屏幕到达数据场最外围轮廓时,将会在屏幕上形成一个多边形区域,如图 3 所示的红色区域,即数据场沿视点方向在屏幕上的投影,可称之为相交投影。投影内的像素沿视点方向发出的光线将会穿过数据场,而投影外的像素沿视点方向发出的光线不会与数据场相交。因此,可以根据像素是否属于数据场沿视点方向在屏幕上的投影来判断是否在该像素点生成光线。

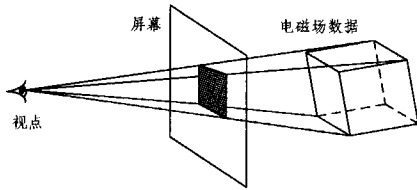


图 3 电磁场数据在屏幕上的相交投影

数据场在空间中的位置不同,相交投影的形状也不相同,考虑对称性并忽略旋转角度,相交投影有 3 种形式,如图 4 中粗线框部分。

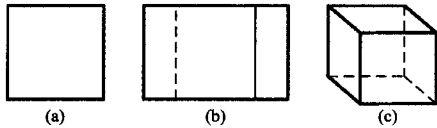


图 4 相交投影的 3 种形式

光线投射算法具有较高的成像质量,但绘制过程中采样和计算量非常大,在个人计算机上实时性运行较为困难,为此设计了基于 CUDA 加速的光线投射算法来提高电磁场数据的绘制速度,具体如表 1 所列。

表 1 基于 CUDA 加速的电磁场数据绘制算法

主机端:	
步骤 1	加载电磁场数据三维纹理 TextureEM
步骤 2	设定视线方向,计算相交投影,得到相交投影纹理 TextureI,与 TextureEM 一起传送至 GPU
设备端:	
步骤 3	生成光线 R,如果 $R \in \text{TextureI}$ ,则 R 对相应屏幕像素的贡献值为 0;否则,执行步骤 4
步骤 4	在数据场内沿光线方向等距离采样,以三线性插值计算采样点处的数据值和梯度
步骤 5	计算采样点的颜色、光照和透明度 $\alpha$ ,如果 $\alpha$ 小于给定的阈值,则转向步骤 4 继续采样;否则,执行步骤 6
步骤 6	计算光线 R 对屏幕像素的贡献值

#### 5 仿真分析

为测试基于 CUDA 的电磁场数据生成和绘制算法的效

率,在个人计算机上进行了仿真。仿真平台:CPU Intel Core i3 530(2.9GHz),内存 2GB,NVIDIA GeForce GT240。

在 CUDA 架构中,SM(Streaming Multiprocessor)是基本的执行单元,每个 SM 包含 8 个流处理器(Streaming Processor,SP),每个 SP 完成一个 Block 的计算,且最多可以生成 1024 个 Thread。以采样点间隔 270m,计算  $10\text{km} \times 10\text{km} \times 10\text{km}$  范围内的电磁场数据为例,如果每一个采样点占用一个 Thread,那么将需要产生 54,872 个 Thread,远远超过了一个 SM 的线程总数。为了防止线程溢出以及减少过多线程同步的时间,以行为单位组织数据场,每个 Thread 计算一行内所有的采样点。电磁场数据加速生成的仿真结果如表 2 所列。

表 2 电磁场数据生成时间对比(单位:ms)

电磁场范围 ( $\text{km}^3$ )及 数据点数量	$10 \times 10 \times 10$ (54,872)	$20 \times 20 \times 20$ (421,875)	$30 \times 30 \times 20$ (940,800)	$30 \times 30 \times 30$ (1,404,928)	$50 \times 50 \times 30$ (3,874,752)
CPU	713	7855	14863	21705	59619
CUDA 加速	29	142	139	172	377
加速比	24	55	107	126	158

随着电磁场范围的增大,利用 CPU 计算电磁场数据的时间也急剧增多,当范围为  $50\text{km} \times 50\text{km} \times 30\text{km}$  时所用时间就已将近一分钟,远远不能满足基本的实时性要求。当数据点较少时,CUDA 的加速比较小,原因是 kernel 函数中数据的存取占用了一定时间,而随着数据点的增多,数据存取产生的延迟被大量的并行计算所掩盖,加速比也随之增大,计算范围为  $50\text{km} \times 50\text{km} \times 30\text{km}$  内的电磁场数据时仅用 377ms。

使用光线投射算法绘制电磁场的时间对比如表 3 所列。当绘制范围为  $10\text{km} \times 10\text{km} \times 10\text{km}$  时,由于计算量较小,能够达到 17fps 的帧速,而绘制范围为  $30\text{km} \times 30\text{km} \times 20\text{km}$  时,速度最大为 3fps。然而,在 CUDA 加速下,绘制帧速比较稳定,主要得益于 CUDA 架构下大量线程的并行运行能力。

表 3 电磁场绘制时间对比(单位:fps)

电磁场范围 ( $\text{km}^3$ )	$10 \times 10 \times 10$ (54,872)	$20 \times 20 \times 20$ (521,875)	$30 \times 30 \times 20$ (940,800)
CPU	17	7	3
CUDA 加速	73	70	63

**结束语** 实时性和交互性是电磁场绘制的重要指标,但在 CPU 环境下却难以实现。本文将大计算量的电磁场数据生成移植到 GPU 中,利用 CUDA 架构大量线程并行执行的特点加速了电磁场数据的计算。针对电磁场体数据的特点,在对光线投射算法的相交判断改进后,通过 CUDA 加速也得到了较高的绘制帧速,达到了实时性要求。

#### 参考文献

- [1] Skolnik M I. Radar Handbook Third Edition [M]. McGraw-Hill, 2008
- [2] 成柏林,张尉.用 Matlab 语言实现雷达探测范围图的绘制[J].空军雷达学院学报,1999,13(4):62-64
- [3] 林卫明,刘德权.利用 OpenGL 技术实现雷达探测范围的三维显示[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2002,26(1):72-75
- [4] Rancić D, Dimitrijević A, Milosavljević A, et al. Virtual GIS for Prediction and Visualization of Radar Coverage [C] // Procee-

dings of Visualization, Imaging, and Image Processing 2003. 2003

- [5] Kostić A, Rančić D. Radar coverage analysis in virtual GIS environment[C]//Proceedings of International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service 2003. Serbia and Montenegro, 2003; 721-724
- [6] 周桥, 徐青, 陈景伟, 等. 电磁环境建模与3维可视化[J]. 测绘科学技术学报, 2008, 25(2): 112-115
- [7] 陈鹏, 魏迎梅, 吴玲达, 等. 硬件加速的雷达作用范围三维可视化研究与实现[J]. 计算机工程与科学, 2008, 30(4): 33-36
- [8] 杨超, 徐江斌, 赵健, 等. 基于多层等值面的电磁环境三维可视化研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(11): 2767-2772
- [9] 杨超, 徐江斌, 吴玲达. 硬件加速的虚拟电磁环境体可视化[J]. 北京邮电大学学报, 2011, 34(1): 55-59
- [10] Longley A G, Rice P L. Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss Over Irregular Terrain, a computer method-1968 [R]. Boulder; Institute For Telecommunication Sciences Boulder Co, 1968
- [11] Hufford G. The ITS Irregular Terrain Model, version 1. 2. 2 — The Algorithm [R/OL]. Colorado: National Telecommunications and Information Administration Institute for Telecommunication Sciences, 2002 [2011-06-07]. [http://flattop.its.bldrdoc.gov/itm/itm\\_alg.pdf](http://flattop.its.bldrdoc.gov/itm/itm_alg.pdf)
- [12] Jarvis A, Reuter H I, Nelson A, et al. Hole-filled seamless SRTM data V4 [CP/OL]. International Center for Tropical Agriculture(CIAT), 2008. <http://srtm.csi.cgiar.org>
- [13] Zhang Wen-bo, Cao Yao-qin, Liu Zhi-guang. Research on Visualization of Electromagnetic Environment over Complex Terrain [C]//Proceedings of the 2012 International Conference on Computer Science and Electronic Engineering. Volume III, 2012; 595-598
- [14] Weinlich A, Keck B, Scherl H, et al. Comparison of High-Speed Ray Casting on GPU using CUDA and OpenGL [C]//Proceedings of the First International Workshop on New Frontiers in High-performance and Hardware-aware Computing (HipHaC'08). 2008; 25-30
- 
- (上接第 51 页)
- [21] Fang Q, Gao J, Guibas L J. Landmark-based information storage and retrieval in sensor networks[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM. Barcelona, Catalunya, 2006; 1-12
- [22] Zhang W, Cao G, Porta T L. Data Dissemination with Ring-Based Index for Wireless Sensor Networks [C] // Proc. 11th IEEE Int'l Conf. Network Protocols(ICNP' 03). Nov. 2003
- [23] Lu C, Xing G, Chipara O, et al. A Spatio-temporal Query Service for Mobile Users in Sensor Networks [C] // Proc. 25th Int'l Conf. Distributed Computing Systems(ICDCS'05). June 2005
- [24] Jiang H, Jin S. Scalable and Robust Aggregation Techniques for Extracting Statistical Information in Sensor Networks [C] // Proc. 26th Int'l Conf. Distributed Computing Systems(ICDCS'06). July 2006
- [25] Xu Jian-liang, Tang Xue-yan, Lee W-C. A New Storage Scheme for Approximate Location Queries in Object-Tracking Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2008, 19(2): 262-275
- [26] Liu H, Jia X, Wan P, et al. Maximizing Lifetime of Sensor Surveillance Systems[J]. IEEE ACM Trans. Networking, 2007, 15(2): 334-345
- [27] Zhang W, Cao G. Optimizing Tree Reconfiguration for Mobile Target Tracking in Sensor Networks [C] // Proc. IEEE INFOCOM' 04. Mar. 2004
- [28] Polastre J, Hill J, Culler D. Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks [C] // Proc. ACM Second Int'l Conf. Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'04). Nov. 2004
- [29] Wang Q X, Chen W P, Zheng R, et al. Acoustic Target Tracking Using TinyWireless Sensor Devices [C] // Proc. Second Int'l Workshop Information Processing in Sensor Networks (IPSN'03). Apr. 2003
- [30] Yang H, Sikdar B. A Protocol for Tracking Mobile Targets Using Sensor Networks [C] // Proc. IEEE Workshop Sensor Network Protocols and Applications. May 2003
- [31] Goel S, Imielinski T. Prediction-Based Monitoring in Sensor Networks; Taking Lessons from MPEG [J]. ACM Computer Comm. Rev., 2001, 31(5)
- [32] Xu Y, Winter J, Lee W-C. Dual Prediction-Based Reporting Mechanism for Object Tracking Sensor Networks [C] // Proc. First Ann. Int'l Conf. Mobile and Ubiquitous Systems (MobiQuitous'04). Aug. 2004
- [33] Kung H T, Vlah D. Efficient Location Tracking Using Sensor Networks [C] // Proc. IEEE Wireless Comm. and Networking Conf. (WCNC'03). Mar. 2003
- [34] Gui C, Mohapatra P. Power Conservation and Quality of Surveillance in Target Tracking Sensor Networks [C] // Proc. ACM MobiCom'04. Oct. 2004
- [35] Patten S, Poduri S, Krishnamachari B. Energy-Quality Tradeoffs for Target Tracking in Wireless Sensor Networks [C] // Proc. Second Int'l Workshop Information Processing in Sensor Networks (IPSN'03). Apr. 2003
- [36] Smith D, Singh S. Approaches to Multisensor Data Fusion in Target Tracking. A Survey [J]. IEEE Trans. Knowledge and Data Eng., 2006, 18(12): 1696-1710
- [37] Teng Jing, Snoussi H, Richard C. Prediction-based Proactive Cluster Target Tracking Protocol for Binary Sensor Networks [C] // IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology. 2007; 234-239
- [38] 李建中, 高宏. 无线传感器网络的研究进展 [J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 1-15
- [39] 陶汝谨, 龚正虎, 卢泽新. 两种新的 push-pull 平衡的大数据量无线传感器网络数据分发算法 [J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(7): 1115-1125
- [40] 彭勇. 无线传感器网络中能量高效的目标跟踪协议研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2009