

空中复杂目标对背景红外辐射的散射的并行计算

李良超, 牛武斌, 吴振森

(西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 提出一种快速计算非朗伯面空中复杂目标对背景辐射的散射的方法。使用 Modtran 软件计算天地背景红外辐射亮度。将复杂目标表面划分成三角面元并在探测方向进行遮挡消隐处理, 在图形处理器 (graphic processing unit, GPU) 内按背景光入射方向划分计算线程, 线程内利用五参数双向反射分布函数 (bidirectional reflectance distribution function, BRDF) 模型计算可见面元对一个方向入射的红外辐射的散射亮度。把所有可见面元的计算结果加权平均获得复杂目标对背景辐射的散射亮度。通过对某飞机目标的计算结果对比发现, 基于 GPU 的并行算法计算速度比中央处理器 (central processing unit, CPU) 提高了百倍以上。

关键词: 散射; 复杂目标; 背景辐射; 图形处理器; 并行计算

中图分类号: O 436.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.12.01

Parallel calculation for scattering of background infrared irradiation from aerial complex targets

LI Liang-chao, NIU Wu-bin, WU Zhen-sen

(School of Sciences, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A fast algorithm of calculating scattering of background infrared radiation from non-lambertian aerial complex targets is presented. The sky and earth background infrared radiation are calculated by using a Modtran software. The surface of the target is partitioned into triangular facets and hidden by detection direction. Threads are partitioned by the incident direction of background light and run in the kernel of the graphic processing unit (GPU). Based on the five parameters bidirectional reflectance distribution function (BRDF) model, scattering intensity of background infrared radiation caused by visible facets from a direction is computed in every thread. The obtained results of all visible facets are weighted and averaged to obtain scattering intensity of the complex target surface. The comparison results of the central processing unit (CPU) calculation and GPU parallel calculation of an aircraft target shows that the GPU parallel calculation improves more than one hundred times.

Keywords: scattering; complex target; background radiation; graphic processing unit (GPU); parallel calculation

0 引言

复杂目标的红外/可见光散射特性研究在目标红外/可见光学特征提取、跟踪、识别、成像仿真、设备研制等方面有重要的应用价值。空中复杂目标受到的背景红外辐射主要来自天空大气和地球背景及太阳的辐射。太阳入射方向单一, 计算简单, 而天地背景的辐射来自天地背景各个方位, 计算复杂, 是影响计算速度的主要因素。目标表面材料的光散射特性可分为朗伯面散射和非朗伯面散射, 朗伯面散射的计算过程相对简单, 计算效率高, 但是大部分实际目标

的表面材料并不能完全以朗伯面对待, 因此非朗伯面散射是研究的重点。有学者先后提出关于粗糙面的散射模型^[1-2], 但都有一定适应性。使用 BRDF^[3] 来研究物体表面的光散射特性成为很多学者的选择, 在图像处理、遥感、目标光学特性等领域得到广泛的应用^[4-7]。BRDF 可以使用粗糙面散射理论计算获得, 也可以通过实验测量建立工程快速计算模型^[8-9]。

对于复杂空中目标, 通常把其表面划分成大量的三角小面元, 每个可见面元都要在指定的接收方向逐波长计算来自半球空间方向的背景光谱辐射的散射, 在传统 CPU 平

收稿日期: 2011-04-21; 修回日期: 2011-09-08。

基金项目: 国家自然科学基金(60771038)资助课题

作者简介: 李良超(1969-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为目标与环境光(电磁)散射特性研究。E-mail: xd_llc@163.com

台上需要大量的计算时间,为研究工作和工程应用带来困难。随着 GPU 技术的快速发展,GPU 已经具有很强的并行浮点运算能力,并在多个领域得到广泛应用^[10-13]。本文提出了利用一种利用英伟达(NVIDIA)公司推出的 GPU 通用计算的统一计算设备架构(compute unified device architecture, CUDA)技术并行计算复杂目标对背景红外辐射散射的快速算法,通过对单个面元和某飞机模型计算结果对比,使用 CUDA 并行计算速度比 CPU 提高了百倍以上。

1 复杂目标对背景红外辐射的散射计算过程

1.1 单个面元对背景辐射的散射计算

目标表面在接收方向可见的小面元的散射计算,是计算目标散射的核心。如图 1 所示,面元法向矢量 \mathbf{n} 朝向空中某方向, $\mathbf{k}_{i,sky}$ 、 $\mathbf{k}_{i,earth}$ 分别代表来自天空、地面某方向的背景辐射光波, \mathbf{k}_s 表示面元在某方向的散射光波,则小面元对某入射光的散射亮度可用下式表达^[14]:

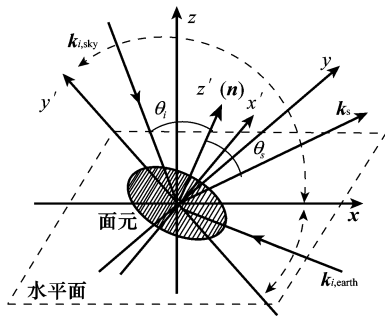


图 1 面元对背景辐射的散射示意图

$$dL_r = f_r L_i \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (1)$$

式中, f_r 代表光谱 BRDF,是与材料、波长、入射、散射角度等参数有关的函数; dL_r 代表面元的散射亮度; θ_i 、 ϕ_i 是入射角、入射方位角; L_i 是来自天空或地面某方向入射的背景光谱辐射亮度,本文采用 Modtran 软件计算获得。

对面元所有背景入射方向和波长积分可得到单个面元对背景辐射在某波段的散射亮度,即

$$L_r = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f_r L_i \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i d\lambda \quad (2)$$

$$L_i = \begin{cases} L_{i,sky}, & \text{当入射方向来自天空方向} \\ L_{i,earth}, & \text{当入射方向来自地面方向} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $L_{i,sky}$ 、 $L_{i,earth}$ 分别表示天空和地面的背景光谱辐射亮度; λ_1 、 λ_2 表示波段的起止始波长。本文使用五参数建立样品的光谱 BRDF 模型,建模方法与原理见文献^[15]。

1.2 复杂目标对背景的散射亮度计算

使用计算机图形学知识对目标所有表面面元在探测器接收方位进行消隐遮挡处理,得到可见面元信息,再对所有

的可见面元采用第 1.1 节的方法计算该面元的散射亮度,加权积分后获得目标的总体散射强度和亮度

$$I_{target} = \sum_{j=1}^m L_{r,j} S_j \quad (4)$$

$$L_{target} = I_{target} / \sum_{j=1}^m S_j \quad (5)$$

式中, I_{target} 和 L_{target} 分别代表目标的散射强度和亮度; m 为可见面元个数; $L_{r,j}$ 是第 j 个可见面元散射亮度, S_j 是第 j 个可见面元在散射方向上的投影面积。

2 GPU 并行化算法

从式(2)~式(5)可以看出,计算目标的散射亮度需要对入射角数、波长数、可见面元数进行多层的积分运算,随着目标表面划分的数据增加,波长、角度积分步长的减小,计算量巨大,计算目标一条角分布曲线需要数小时甚至几十小时的时间,给研究工作带来很大困难。

2.1 CUDA 并行计算模型

CUDA 编程模型将 CPU 作为主机(Host),GPU 作为计算设备(Device)。GPU 内核按网格(Grid)划分,网络下划分线程块(Block),每个线程块里最多可以划分 512(Fermi 核心:1 024)个线程。Block 内的线程并行执行,各 Block 间并行执行,Block 及 Block 内的线程由 GPU 调度可以在不同核心的硬件上执行^[16]。与 CPU 相比,GPU 具备数量巨大的线程并行计算的能力,但要求计算必须是高度并行化的,并行数目越大,其硬件利用率就越高,计算优势越明显。因此使用 CUDA 计算,算法是否可并行及选择并行方案是很重要的。

2.2 并行线程的划分

要进行并行计算,并行的线程间依赖性越低越好,对式(3)和式(5)分析可以看出,计算目标的散射可以有不同的并行方案,如可以按可见面元数、波长数、背景入射角方位数等划分线程,每种方案划分的线程都可以独立并行运行,差别是线程的数目不同,从数值上分析,如果入射方位按 1° 作为积分增量,则有 32 400(90×360)个人射方位,数量比波长和可见面元数都要大得多,即可划分的线程数目是最多的,根据 GPU 的计算特性,为了提高 GPU 并行的效率,本文最终选择按入射方位划分的方案,每个人射方位对应一个线程,线程间除了一些初始参数不同外,计算流程都是一样的,且可以独立完成,线程可以完全并行执行。

这样在线程中计算一个面元的散射亮度公式可以从式(2)可以简化到下面的形式:

$$L_r = \sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} f_r L_i \cos \theta_i \sin \theta_i \Delta\theta \Delta\phi \Delta\lambda \quad (6)$$

式中, $\Delta\theta$ 、 $\Delta\phi$ 分别是划分线程时入射角、入射方位角的积分增量; $\Delta\lambda$ 是波长间隔,对每个线程都是固定值,在每个线程中循环计算出所有可见面元的散射亮度。

2.3 目标散射并行算法流程

图 2 是并行算法的流程图。在计算开始时 CPU 完成初始化工作,包括:目标模型的读入,参数设置,调用 Modtran 软件计算天、地背景光谱辐射亮度,并在探测器方向对目标进行消隐、遮挡处理,得到的可见面元信息。然后将计算需要的数据从主机(CPU)端复制到设备端(GPU)内存,并在 GPU 中按背景入射方位 1° 为增量划分、启动计算线程,共 32 400 个线程。如图 2 中,Thread1 (0,0) 计算来自入射角、入射方位角(0,0)方向上背景辐射的散射,Thread n ($\pi/2, 2\pi$) 计算来自入射角、入射方位角($\pi/2, 2\pi$)方向的入射,所有线程计算完毕后,利用并行归约(Reduction)的算法,在 GPU 内计算出全部可见面元的散射亮度,得到目标的散射强度和亮度,将结果读回到主机内存,由 CPU 做后续的其他操作。

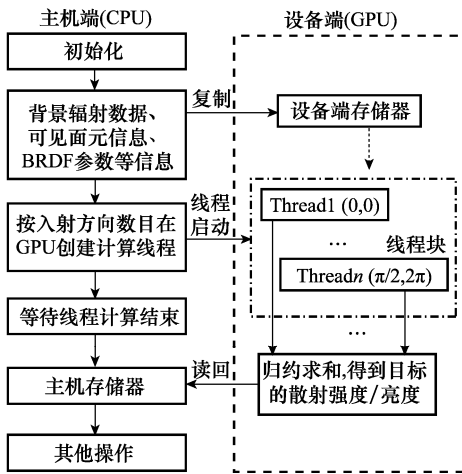


图 2 目标散射并行计算流程

3 计算实例与分析

下面以表面为涂漆材料的某飞机目标为例,只计算目标对天空背景和地面背景辐射的散射,对比使用 CUDA 并行算法和使用 CPU 的计算结果。计算波段: $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 。设飞机目标位于东经 120° , 北纬 25° , 高度 $2\ 000\ \text{m}$, 时间为 5 月 10 日中午 $13:00$ 。

计算设备: CPU 为 Pentium (R) Dual-Core, 主频 $2.60\ \text{GHz}$, 显卡为 NVIDIA GeForce GT 240, $512\ \text{M}$ 显存, 流处理器(SP)的数量为 96。

程序计算了围绕目标 $360^\circ, 1^\circ$ 1 个数据点, 共 360 个接收方位的角分布曲线, 接收方位与目标姿态如图 3 所示, 图中虚线为接收方位变化路径, 圆点为开始位置。计算结果如图 4 所示。图中 $0^\circ/360^\circ, 180^\circ$ 分别是目标的背部和腹部方位。

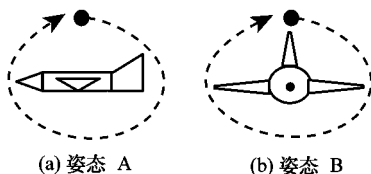
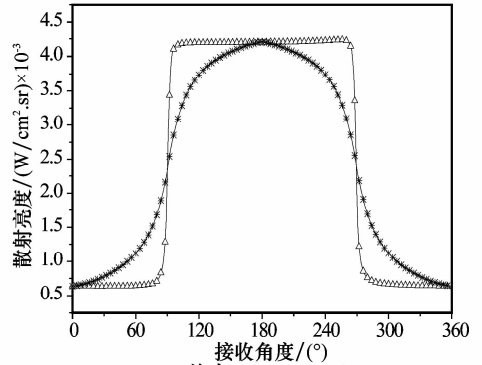
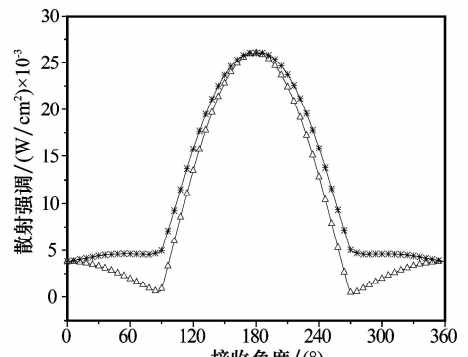


图 3 目标姿态及计算方位示意图

从图中可以看出,机腹方位亮度和强度大于机背方向,原因是计算时采用的地面背景辐射值大于天空背景的辐射。姿态 A 和姿态 B 是围绕飞机不同的方位变化的,观察到的目标外观不同,接收的亮度和强度也不一样。



(a) 散射亮度角分布曲线



(b) 散射强度角分布曲线

图 4 飞机目标对天地背景辐射的散射亮度、强度角分布曲线

表 1 是单个面元、两个面元及飞机目标(4 130 个面元) CPU 计算和 GPU 并行计算角分布曲线的时间比较,计算时间均为多次平均值。从表中可以看出,在面元较少时 GPU 并行计算速度比 CPU 提高了一百多倍,在面元数据达到 4 千多个时, GPU 的速度提高了两百多倍,体现了 GPU 在大规模并行计算时的优势。

表 1 GPU 和 CPU 计算时间比较

	一个面元	两个面元	某飞机: 4 130 个面元
CPU 耗时/s	35.260	67.128	103 051.67
GPU 耗时/s	0.290	0.532	364.14
GPU 加速比	121.6	126.2	283.1

目前基于 GPU 的计算程序设计和基于 CPU 的程序设计还是有一定的差别, GPU 的并行线程通常执行相同的操作, 适合大规模计算, 且算法对 GPU 硬件结构有一定依赖性, 需要针对不同结构体系的 GPU 进行优化, 对算法的设计有一定的影响, 另外小规模运算, 或存在大量选择分支流程的运算 GPU 的优势可能不会很明显。

4 结束语

通过在 GPU 上利用 CUDA 技术, 实现了目标对于天

地背景红外辐射的散射的并行计算,与 CPU 相比极大的提高了计算速度,为目标红外/可见光光谱散射特性的获取、分析研究提供了有效的手段,在目标和环境红外/可见光成像、实时场景仿真等方面有应用价值。

参考文献:

- [1] Ragheb H, Hancock E R. Lambertian reflectance correction for rough and shiny surfaces[C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Image Processing*, 2002; 553 - 556.
- [2] 刘建斌, 吴健. 空间目标的光散射研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(4): 802 - 805. (Liu J B, Wu J. Light scattering of spatial target [J]. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(4): 802 - 805.)
- [3] Nicodemus F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity[J]. *Applied Optics*, 1970, 9(6): 1474 - 1475.
- [4] Li D Y, Yang H J, Zhu L L. Light scattering and infrared radiation of spatial object[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2006, 27(12): 1609 - 1617.
- [5] Jan P, Chen J M, Tiit N. Estimation of vegetation clumping index using MODIS BRDF data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(9): 2645 - 2657.
- [6] 吴振森, 窦玉红. 空间目标的可见光散射与红外辐射[J]. 光学学报, 2003, 23(10): 1250 - 1254. (Wu Z S, Dou Y H. Visible light scattering and infrared radiation of spatial object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(10): 1250 - 1254.)
- [7] 袁艳, 孙成明, 张修宝, 等. 姿态变化对空间目标可见光特性的影响分析[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2748 - 2752. (Yuan Y, Sun C M, Zhang X B, et al. Analysis of influence of attitude variation on visible characteristics of space target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2748 - 2752.)
- [8] 张涵璐, 吴振森, 张昌民, 等. BRDF 的遗传算法和遗传模拟退火算法建模及比较[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(7): 1529 - 1531. (Zhang H L, Wu Z S, Zhang C M, et al. Modeling and comparison of BRDF with GA and GSAA[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(7): 1529 - 1531.)
- [9] Zeng J A, Hanssen L. Development of an infrared optical scattering instrument from 1 μm to 5 μm [C]// *Proc. of SPIE, Infrared Spaceborne Remote Sensing and Instrumentation XVII*, 2009, 7453: 74530Q1 - 74530Q10.
- [10] Jiang W Q, Zhang M, Wang Y. CUDA-based radiative transfer method with application to the EM scattering from a two-layer canopy model[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2010, 24(17 - 18): 2509 - 2521.
- [11] Xu K, Ding D Z, Fan Z H. Multilevel fast multipole algorithm enhanced by GPU parallel technique for electromagnetic scattering problems[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2010, 52(3): 502 - 507.
- [12] Lezar E, Davidson D B. GPU-accelerated method of moments by example: monostatic scattering[J]. *Antennas and Propagation Magazine*, 2010, 52(6): 120 - 135.
- [13] Du L G, Li K, Kong F M. Parallel 3D finite difference time domain simulations on graphics processors with CUDA[C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering*, 2009: 1 - 4.
- [14] Wu Z S, Liu A A. Scattering of solar and atmospheric background radiation from a target[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2002, 23(6): 907 - 917.
- [15] 曹运华, 吴振森, 张涵璐, 等. 粗糙目标样片光谱双向反射分布函数的实验测量及其建模[J]. 光学学报, 2008, 28(4): 792 - 798. (Cao Y H, Wu Z S, Zhang H L, et al. Experimental measurement and statistical modeling of spectral bidirectional reflectance distribution function of rough target samples[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4): 792 - 798.)
- [16] 张舒, 褚艳利, 赵开勇, 等. GPU 高性能运算之 CUDA[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (Zhang S, Chu Y L, Zhao K Y, et al. *CUDA-the high-performance computing GPU*[M]. Beijing: China Water Power Press, 2009.)