

## 基于 CUDA 并行计算的空中目标红外辐射成像计算

刘连伟<sup>1</sup>, 董士奎<sup>2</sup>, 陈前荣<sup>1</sup>, 邹前进<sup>1</sup>, 樊宏杰<sup>1</sup>, 屈东胜<sup>1</sup>

(1. 中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003;

2. 哈尔滨工业大学 工信部空天热物理重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 建立了一种包含蒙皮和尾焰的空中目标红外辐射成像 GPU 并行计算方法。采用 SLG 模型计算尾焰辐射气体的红外特性, 采用 LOS 方法求解尾焰红外辐射传输方程, 根据本体与三维尾焰的成像几何关系, 采用正向光线追迹方法计算蒙皮辐射成像, 采用反向光线追迹方法计算尾焰辐射成像, 建立了目标投影算法, 并在蒙皮投影计算模块和尾焰辐射计算模块采用 CUDA 并行提高计算速度, 实现了探测器入瞳处目标红外光谱图像的快速计算。结果表明: 投影成像算法可准确生成设定条件下的目标图像, 目标红外图像辐射分布与温度分布一致, 尾焰辐射强度计算结果与实验结果符合较好, CUDA 并行算法可有效提高程序的计算效率, 当计算量较大时, 蒙皮投影模块的计算加速可达百倍以上。

**关键词:** 红外辐射; 空中目标; 图像仿真; CUDA 并行计算

**中图分类号:** TN219      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0404003

## Infrared radiation imaging calculation of aerial target based on CUDA parallel computing

Liu Lianwei<sup>1</sup>, Dong Shikui<sup>2</sup>, Chen Qianrong<sup>1</sup>, Zou Qianjin<sup>1</sup>, Fan Hongjie<sup>1</sup>, Qu Dongsheng<sup>1</sup>

(1. Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China;

2. Key Laboratory of Aerospace Thermophysics, Ministry and Information Technology,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A GPU parallel computing method for infrared target imaging was established, in which skin and plume was included. The SLG model was used to calculate the infrared characteristics of the radiation gases, and the LOS method was used to solve the infrared radiation transmission equation of the plume. According to the imaging geometry relationship between the surface and the three-dimensional plume, a target projection algorithm was established, in the method the forward ray tracing method was used to calculate the surface radiation imaging, and the reverse ray tracing method was used to calculate the plume radiation imaging. The CUDA parallel method was used to increase the calculation speed in the skin projection calculation module and the plume radiation calculation module, and the fast calculation of the target infrared spectrum image at the entrance of the detector was realized. The results show that the projection imaging algorithm can accurately generate the target image under the set conditions. The radiation distribution of the target infrared image is consistent with the temperature distribution. The calculation result of the tail flame radiation intensity is in good agreement with the experimental results. The CUDA parallel algorithm can effectively improve the computational efficiency of the program, the

收稿日期: 2019-12-12; 修订日期: 2020-01-15

基金项目: 国家自然科学基金 (11504420)

作者简介: 刘连伟 (1985-), 男, 硕士, 主要从事红外对抗仿真实验方面的研究工作。Email: yyoohh@126.com

calculation speed of the skin projection module can be more than hundred times when the amount of calculation is large.

**Key words:** infrared radiation; aerial target; image simulation; CUDA parallel compute

## 0 引言

随着红外探测器件性能的提高以及大规格、多波段红外焦平面阵列技术的日益成熟,红外探测技术在目标探测预警、跟踪识别等方面得到广泛应用,而通过数值计算的方法,快速准确的仿真飞机、导弹等空中目标蒙皮和尾焰辐射经大气传输后到达探测器形成的红外图像,是开展目标红外特性研究、评估红外探测设备性能的有效手段<sup>[1]</sup>。

蒙皮和尾焰是空中目标红外辐射的主要来源,蒙皮辐射计算采用普朗克公式计算,尾焰辐射计算相对复杂,又分为辐射组分光谱辐射特性计算和辐射传输计算两部分互相关联的内容。在 HITEMP、CDSO 等光谱数据库的基础上,国内外学者采用逐线计算、谱带模型等辐射特性计算方法和离散坐标、蒙特卡洛等辐射传输方法开展了计算研究和验证工作<sup>[2-4]</sup>,基于 OpenGL 等软件包,张建奇团队<sup>[5-6]</sup>、黄建峰<sup>[7]</sup>等实现了红外图像的生成。

CUDA 是 NVIDIA 公司提供的 GPU 并行编程环境,国外许多学者已成功用于大气、云层等的辐射传输计算<sup>[8-9]</sup>,国内西安电子科技大学的 Guo Xing<sup>[10]</sup>实现了空中目标对太阳和环境反射辐射的并行计算,中国科学院大学的蔡方伟<sup>[11]</sup>实现了目标和背景在探测器入瞳处的辐射照度的并行实时计算,以上研究均表明: CUDA 的计算速度可提高百倍以上,是一种有效提高计算效率的并行方法。

文中以空中目标蒙皮和大尺度三维尾焰的红外辐射特性为研究对象,以目标蒙皮温度分布和三维尾焰流场作为输入,根据蒙皮和尾焰不同的几何成像关系并结合红外辐射算法建立了目标二维成像算法,解决了蒙皮对尾焰辐射的遮挡、以及蒙皮辐射穿过尾焰流场时的辐射传输问题,开发了红外辐射计算软件,最终实现目标辐射经大气传输后到达探测器入瞳前的红外图像仿真,并对计算结果进行了分析。此外,在程序中的蒙皮投影计算和尾焰光谱辐射计算部分采用 CUDA 并行计算方法,提高了计算速度,并分析了不同运算量下的并行计算加速比。

## 1 辐射计算模型

已知目标蒙皮温度后,可由普朗克公式计算蒙皮辐射亮度:

$$L_{\lambda} = \frac{\varepsilon_{\lambda} c_1}{\pi \lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (1)$$

式中:  $L_{\lambda}$  为蒙皮光盘辐射亮度;  $\varepsilon_{\lambda}$  为蒙皮光谱发射率;  $c_1$ 、 $c_2$  为第一、第二辐射常数;  $\lambda$  为波长;  $T$  为蒙皮温度。

采用单线组谱带模型 (SLG)<sup>[12]</sup> 计算尾焰气体辐射,微元中气体的光学厚度计算公式为:

$$X_{\lambda, \text{tot}} = \sum_i \left( \sqrt{1 - Y_i^{-1/2}} \cdot X_i^* \right) \quad (2)$$

$$Y_i = \left[ 1 - \left( \frac{X_{C,i}}{X_i^*} \right) \right]^{-2} + \left[ 1 - \left( \frac{X_{D,i}}{X_i^*} \right) \right]^{-2} - 1 \quad (3)$$

式中:  $X_{\lambda, \text{tot}}$  为气体组分的总光学厚度; 下标  $i$  表示尾焰中的第  $i$  种辐射气体,文中主要考虑  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}$  气体;  $Y_i$  为谱线展宽作用下的光学厚度参量;  $X_i^*$  为弱线近似的光学厚度参量;  $X_{C,i}$  为碰撞展宽影响的光学厚度参量值;  $X_{D,i}$  为多普勒展宽影响的光学厚度参量值。

采用视在光线法 (LOS) 计算尾焰红外辐射传输<sup>[13]</sup> 问题, LOS 方法的基本思想是将三维非均匀介质中的辐射传输简化为一维多层介质的辐射传输问题: 射线沿探测方向与流场相交,将相交部分沿射线方向分层,并假定同层介质均匀、等温,则沿着射线方向逐层积分即可计算该探测方向上的红外辐射与透过率。

如图 1 所示, LOS 射线上的红外辐射传输方程的离散表达式为:

$$I_{\lambda} = I_{\lambda}^0 e^{\left( - \sum_{m=1}^N X_{\lambda, \text{tot}}^m \right)} + \sum_{n=2}^N \left[ I_{b, \lambda}^{n-1} \left( 1 - e^{-X_{\lambda, \text{tot}}^{n-1}} \right) e^{-\sum_{j=n}^N X_{\lambda, \text{tot}}^j} \right] \quad (4)$$

式中:  $I_{\lambda}$  为 LOS 出射光谱辐射;  $I_{\lambda}^0$  为 LOS 入射光谱辐射,如壁面、环境等背景的光谱辐射,若不考虑背景辐射,则该项取零;  $I_{b, \lambda}^{n-1}$  为第  $n-1$  层气体的黑体光谱辐射;  $\sum_{j=n}^N X_{\lambda, \text{tot}}^j$  为第  $n$  层至 LOS 射线入射点的气体总光学厚度。

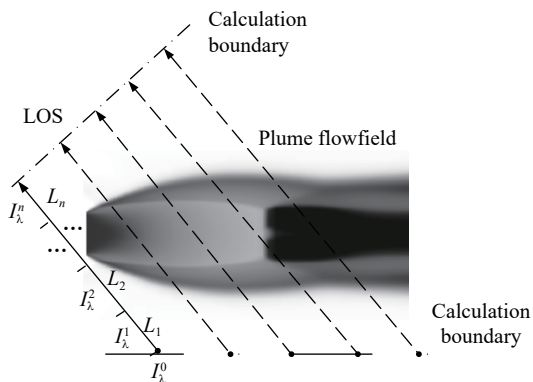


图 1 LOS 方法示意图

Fig.1 Schematic of the LOS method

LOS 射线上的光谱透过率计算公式可离散为:

$$\tau_{\lambda} = e^{-\sum_{m=1}^N X_{\lambda,tot}^m} \quad (5)$$

## 2 投影成像模型

由于蒙皮和尾焰遮挡关系复杂,如图 2 所示,尾焰流场可能会对蒙皮辐射存在遮蔽影响,因此,根据探测器成像几何关系以及目标蒙皮、尾焰成像特性,采用不同的成像方法,实现探测器入瞳处的目标红外图像计算。其中,大气辐射传输通过调用 Modtran 计算。

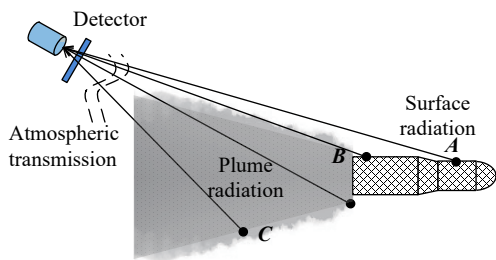


图 2 目标红外成像计算示意图

Fig.2 Schematic of target infrared imaging calculation

### 2.1 目标蒙皮成像

如图 2 中 A、B 线所示,目标蒙皮成像采用正向光线追迹的计算方法,即以蒙皮各面元为计算起始点,计算蒙皮红外辐射成像。能量上,计算面元光谱辐射经尾焰和大气辐射传输后,到达探测器入瞳处的表观辐射,空间上,由面元方向和中心坐标计算在探测器上的成像位置,并将落入同一像元的蒙皮辐射累加,从而实现目标蒙皮的红外辐射成像计算,此外,由于蒙皮边缘不能充满探测器的单个像元视场,同时计

算蒙皮在探测器各像元上的成像面积用于后续成像计算。

面元红外辐射经尾焰和大气辐射传输后到达探测器入瞳前的表观辐射亮度  $L'_{t,\lambda}$  计算公式为:

$$L'_{t,\lambda} = (L_{t,\lambda}\tau_{p,\lambda} + L_{p,\lambda})\tau_{atmo,\lambda} + L_{atmo,\lambda} \quad (6)$$

式中,  $L_{t,\lambda}$  为面元的真实光谱辐射亮度;  $\tau_{p,\lambda}$  和  $L_{p,\lambda}$  分别为面元至探测器路程上的尾焰透过率和红外辐射,当路程不穿过尾焰时,  $\tau_{p,\lambda}=1$ ,  $L_{p,\lambda}=0$ , 路程穿过尾焰时,由公式 (4)、(5) 计算路径上的红外辐射和透过率;  $\tau_{atmo,\lambda}$  和  $L_{atmo,\lambda}$  分别为面元至探测器路程上的大气透过率和红外辐射,将公式 (4) 代入公式 (6) 中,此时面元的表观辐射亮度计算公式可以表示为:

$$L'_{t,\lambda} = \left( L_{t,\lambda} e^{-\sum_{m=1}^N X_{\lambda,tot}^m} + \sum_{n=2}^N \left[ I_{b,\lambda}^{n-1} (1 - e^{-X_{\lambda,tot}^{n-1}}) e^{-\sum_{j=n}^N X_{\lambda,tot}^j} \right] \right) \tau_{atmo,\lambda} + L_{atmo,\lambda} \quad (7)$$

若简单地以面元中心点或顶点坐标计算面元落入哪一探测器像元,当探测器象元分辨率不能远大于面元尺度时,如图 3 中 (a) 例所示,采用简单投影算法会导致应分布在 10 个像元内的辐射能量集中于 1 个像元,导致计算误差很大,因此,采用将面元细分为更小面元的方法,如图 3 中 (b) 所示,使细分面元远小于探测器的像元分辨率,再采用简单投影的算法计算面元成像,提高计算准确性。

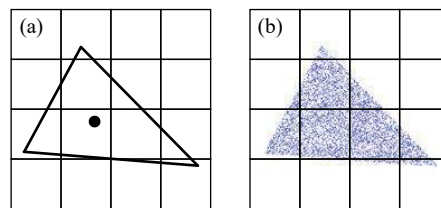


图 3 面元细分投影成像示意图

Fig.3 Schematic of subdivision surfaces projection imaging

### 2.2 发动机尾焰成像

如图 2 中 C 线所示,发动机尾焰成像采用反向光线追迹的计算方法,即以探测器各像元为计算起始点,以像元探测方向为指向生成 LOS 射线,能量上,首先计算该射线上的尾焰真实光谱辐射,然后计算尾焰辐射经大气传输后到达探测器入瞳处的表观辐射,空间上,对蒙皮位置的成像像元,当蒙皮在该像元的

成像面积占像元应成像面积的比例高于一定值时,由于计算蒙皮辐射时已考虑尾流辐射传输影响,不再重复计算,当蒙皮成像面积占比小于一定值时,计算尾焰的表观光谱辐射,并根据蒙皮辐射及蒙皮与尾焰面积的各自占比,采用加权平均的方式计算该像元的红外辐射亮度:

$$L'_\lambda = \eta L'_{t,\lambda} + (1 - \eta) L'_{p,\lambda} \quad (8)$$

式中:  $\eta$  为蒙皮的成像面积占比;  $L'_{t,\lambda}$  为蒙皮的表观光谱辐射亮度;  $L'_{p,\lambda}$  为尾焰的表观光谱辐射亮度。

其中,蒙皮成像面积占比的定值在程序中取 0.99,即当目标机体的成像面积占整个成像像元面积的 99% 以上时,不再考虑剩余 1% 部分的辐射影响,由此引起的计算误差一般小于 1%。

此外,为捕捉尾焰核心区的精细辐射分布,根据核心区贴于本体的位置特征,对相应位置的探测像元进行加密处理以提高计算精度。

### 3 CUDA 并行计算

CUDA 是 CPU 和 GPU 混合计算的平台,在 CUDA 架构下,一个程序分为主机端和设备端两部分,其中主机端代码在 CPU 上执行,设备端代码则在 GPU 上执行,一个 CUDA 程序中依次执行多个设备端代码。由于显卡通过 PCI-E 接口与主机互联,并不能直接访问主机内存,因此设备端代码运行前需先将计算参量拷贝由主机内存拷贝至显卡内存,计算结束后再把计算结果由显卡内存拷贝至主机内存。

目标红外成像计算需要在面元网格、光谱等层面上进行大量计算,适合采用硬件调度模式为 SPMD (Single Program Multiple Data, 即每个线程执行相同的代码,但每个线程调用的数据并不相同) 的 GPU 并行方法提高计算速度。文中基于 VS 2013(C++)+CUDA 8.0 软件平台开发了目标红外成像计算软件,程序流程如图 4 所示。

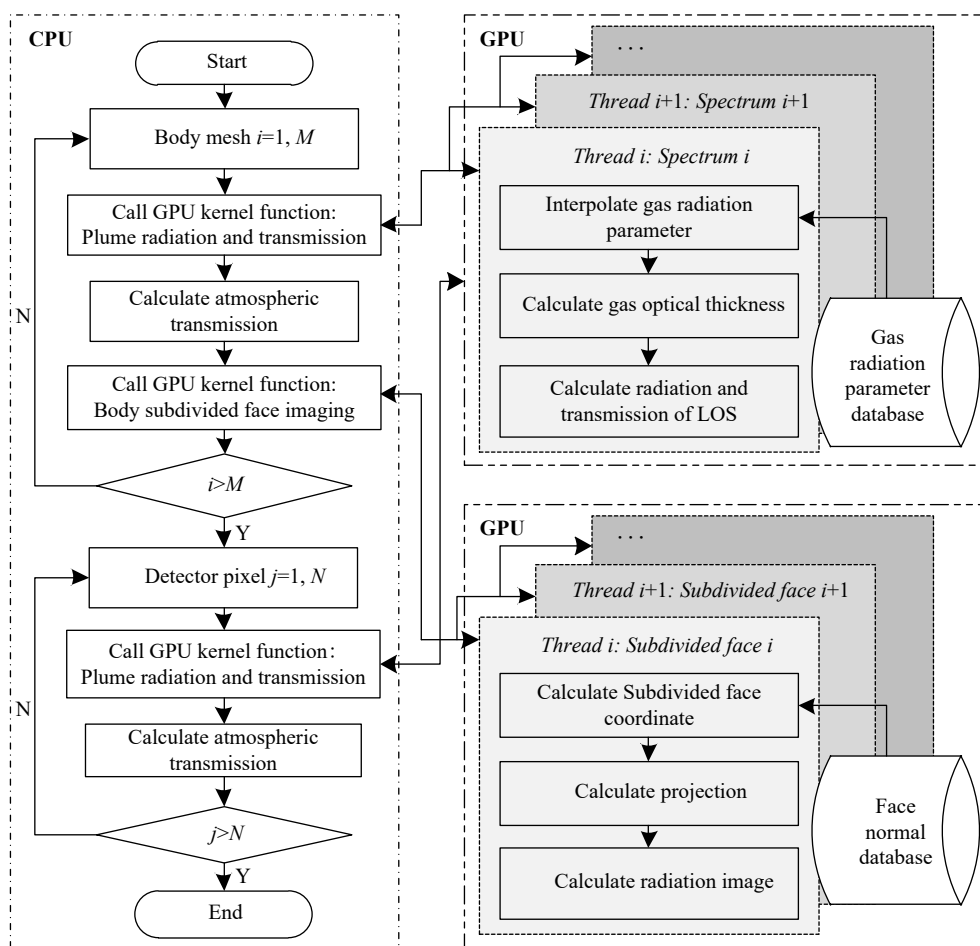


图 4 目标红外成像计算流程图

Fig.4 Flow chart of target infrared imaging program

程序中,在蒙皮投影计算和尾焰光谱辐射计算部分采用 CUDA 并行,其并行层面分别为面元细分数和光谱数,即分别建立与面元细分数和光谱数量相同的 GPU 线程进行计算。

### 4 计算结果分析

基于建立的目标红外辐射成像计算软件,以某型号飞机为例计算了其红外图像,对计算结果进行了验证,并对 CUDA 并行加速性能进行分析。

#### 4.1 辐射计算结果验证

飞机蒙皮温度分布和尾焰流场作为计算输入,如图 5 所示,图 5 中左图为飞机蒙皮温度分布,右图上为尾焰流场的温度分布,右下图为尾焰流场 CO<sub>2</sub> 浓度分布。

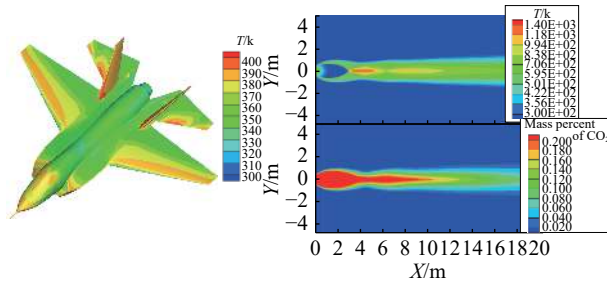


图 5 飞机蒙皮温度和发动机尾焰流场

Fig.5 Temperature of aircraft skin and flowfield of engine plume

设定观测方位角、俯仰角均为 40°,软件计算结果如图 6 所示。整体上,蒙皮和尾焰的辐射分布与其温度分布一致,另取机身长度和翼展长度为特征值,目标成像的尺度与特征值大小误差在一个像素的尺度范围内,表明投影成像算法准确。

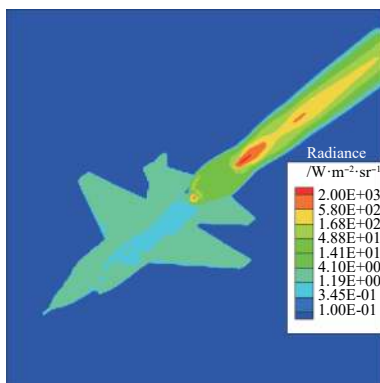


图 6 飞机中波红外辐射亮度图像

Fig.6 Aircraft infrared radiance image of mid-wave

依据 Avital 等人对 BEM 发动机尾焰的地面红外辐射实验数据<sup>[14]</sup>对尾焰辐射计算进行了验证,选取与实验相同的边界条件计算了发动机流场,使用建立的红外成像软件计算 1.5~5.5 μm 波段内的尾焰光谱辐射强度,计算结果与实验结果的对比如图 7 所示,整体上计算结果与实验结果吻合较好,其中,3.5 μm 为 HCl 气体辐射带,由于辐射计算所用数据库光谱分辨率较测量仪器更高,因此,计算结果较实验结果起伏变化较大,但辐射总量基本符合。

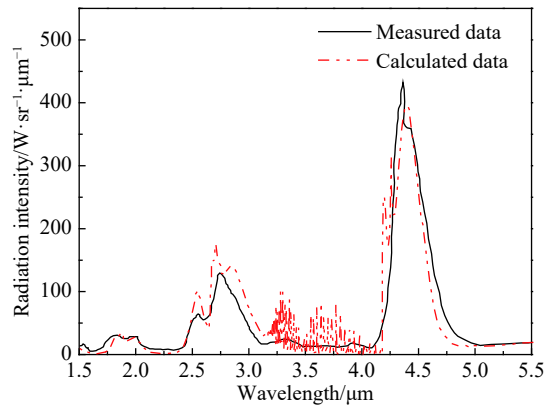


图 7 尾焰辐射计算结果与实验结果对比

Fig.7 Comparison of the plume radiation data between calculated and measured

#### 4.2 并行加速分析

如图 4 所示,由于程序中既有串行代码部分,又有并行代码部分,对软件的整体计算速度进行统计分析并不能准确体现 CUDA 并行的加速能力,因此,以本体网格投影子程序为对象,统计该子程序的运行时间,编写相同功能、相同算法的串行程序并统计运行时间,以此分析 CUDA 的加速性能。测试电脑 CPU 为 i7-7700,主频为 3.6 GHz,显卡为 NVIDIA GTX 1060,频率 1.6GHz,显存 6G,CUDA 核心数为 1280。

将面元细分为不同数量,记录相应串行程序和并行程序的运行时间,并定义加速比为二者运行时间之比,结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看出,并行程序计算耗时始终小于串行程序,且随着面元细分数的增加,加速比增大,当面元细分数达 50 000 时,加速比达 563.91,CUDA 并行加速效果明显。此外,当提分面元数从 500 增大至 50 000 时,串行程序计算耗时增大 100 倍,与面元细分倍数一致,而并行程序计算耗时增大 2.4 倍,原因

在于并行程序中,需要将计算参数从主机内存拷贝至显卡内存, GPU 计算完成后还需将计算结果从显卡内存拷贝至主机内存,两次内存拷贝会耗费一定的时间,而在统计并行程序计算时间时,将内存拷贝时间统计在内,导致并行耗时的增大倍数与计算量不一致。

表 1 本体投影模块 CUDA 计算加速比

Tab.1 CUDA computation speed ratio of skin projection module

Subdivision counts	Serial program runtime/s	Parallel program runtime/s	Ratio
500	2.48	0.18	13.78
2 000	9.98	0.19	52.53
5 000	24.82	0.21	118.19
10 000	49.51	0.22	225.05
50 000	248.12	0.44	563.91

## 5 结 论

文中根据蒙皮和尾焰的成像特性和辐射计算方法,建立了空中目标红外图像计算方法,其中,采用正向光线追迹方法计算目标蒙皮的红外投影成像,采用反向光线追迹方法计算尾焰的红外辐射成像,并通过细分加密的方式提高了成像精细度。基于 VS 2013+ CUDA 8.0 软件平台开发了目标红外成像计算软件,可以用于计算目标真实和表观光谱红外图像,对软件计算结果的准确性进行了验证,并分析了 CUDA 并行计算的加速能力,计算结果表明:软件可以正确生成设定观测角度下的目标红外图像,尾焰辐射计算结果与实验结果符合较好, CUDA 并行可以显著提高计算速度,尤其当计算量较大时,并行程程序的加速比可达 500 以上。

软件生成的红外图像可用于目标红外特性分析,也可为目标红外探测、识别提供参考。

### 参考文献:

[1] Fan Jinxiang, Yang Jianyu. Development trends of infrared imaging detecting technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3145–3153. (in Chinese)  
范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3145–3153.

[2] Fisher A S, Rani S L. Comparison of wide band, narrow band,

and SLW models with HITRAN and HITEMP for predicting radiative heat transfer[C]//47th AIAA Thermophysics Conference, 2017.

[3] Zhou Y, Wang Q, Li T. A new model to simulate infrared radiation from an aircraft exhaust system [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(2): 651–662.

[4] Bao Xingdong, Mao Hongxia, Wei Jie, et al. Research on infrared radiation signatures of high-altitude plume based on DSMC method[C]//International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2016:101570D.

[5] Zhu Jiao. Analysis and simulation on multi-band infrared imaging feature of missile target[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.(in Chinese)  
朱姣. 导弹目标多波段红外成像特征建模仿真分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.

[6] Tian Limin. High realistic infrared scene simulation based on ray tracing[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.(in Chinese)  
田利敏. 基于光线跟踪的高真实感红外场景生成[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.

[7] Huang Jianfeng, Fan Xiaoli, Wang Jun. Infrared dynamic scene simulation based on OSG [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 18–23. (in Chinese)  
黄建峰, 范小礼, 王俊. 基于OSG的红外动态场景仿真[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S1): 18–23.

[8] Huang B, Mielikainen J, Oh H, et al. Development of a GPU-based high-performance radiative transfer model for the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) [J]. *Journal of Computational Physics*, 2011, 230(6): 2207–2221.

[9] Russkova T V. Monte Carlo simulation of the solar radiation transfer in a cloudy atmosphere with the use of graphic processor and NVIDIA CUDA technology [J]. *Atmospheric & Oceanic Optics*, 2018, 31(2): 119–130.

[10] Guo X, Wu J, Wu Z, et al. Parallel computation of aerial target reflection of background infrared radiation: performance comparison of OpenMP, OpenACC, and CUDA implementations [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2016, 9(4): 1653–1662.

[11] Cai Fangwei. Research on real-time infrared radiation transmission and imaging simulation[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.(in Chinese)  
蔡方伟. 实时红外辐射传输与成像仿真技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.

[12] Ludwig C B. Handbook of Infrared Radiation from Combustion Gases. NASA SP-3080[Z]. NASA Special Publication, 1973,

- 3080(4): 1705–1708.
- [13] Niu Q, Zhihong H E, Dong S. IR radiation characteristics of rocket exhaust plumes under varying motor operating conditions [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(3): 1101–1114.
- [14] Avital G, Cohen Y, Gamss L, et al. Experimental and computational study of infrared emission from under expanded rocket exhaust plumes [J]. *Journal of Thermophysics & Heat Transfer*, 2001, 15(4): 377–383.