

文章编号: 1672-8785(2016)11-0018-06

地面坦克目标红外仿真方法研究

范梦萍 张 瑜 徐 华 钱芸生

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘 要: 红外视景仿真目前已成为红外成像制导武器设计和评估的一种重要方法。在分析红外成像原理的基础上, 提出了一种基于 OpenGL 的地面坦克目标实时红外视景仿真方法, 并编制了仿真程序软件。首先, 利用 OpenGL 建立可见光场景, 并使用 ANSYS 软件构建该场景的温度场模型; 其次, 考虑模型和视点间的大气衰减作用, 利用 Modtran 软件建立大气衰减模型; 最后, 对模型各部分到达探测器表面的红外辐射强度进行灰度量化处理, 实现可见光场景的实时渲染, 得到对应的红外仿真图像。仿真结果表明, 该系统提高了计算目标红外辐射分布的实时性和便捷性, 能够实时生成不同波段、不同大气环境下的红外图像。

关键词: 红外成像仿真; 红外辐射; 大气传输模型; 实时性

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.11.004

Research on Infrared Simulation Method of Ground Tank Target

FAN Meng-ping, ZHANG Yu, XU Hua, QIAN Yun-sheng

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: At present, infrared scene simulation has become an important method for the design and evaluation of infrared imaging guided weapons. On the basis of analyzing the principle of infrared imaging, a real-time infrared scene simulation method of ground tank targets based on OpenGL is proposed and a software for simulation program is compiled. Firstly, a visible light scene is built by OpenGL and the temperature field model of the scene is built by the ANSYS software. Secondly, considering the attenuation effect of the atmosphere between the model and the viewpoint, an atmospheric attenuation model is established by the Modtran software. Finally, the intensity of infrared radiation from each part of the model to the surface of the detector is quantified in gray-level so as to realize the real-time rendering of the visible light scene and obtain the corresponding infrared simulation image. The simulation results show that the system can improve the real-time performance and convenience in the calculation of the infrared radiation distribution of targets and can generate infrared images in different wavebands under different atmospheric environment conditions in real time.

Key words: infrared imaging simulation; infrared radiation; atmospheric transfer model; real-time

收稿日期: 2016-08-30

作者简介: 范梦萍 (1993-), 女, 湖南邵阳人, 硕士生, 主要从事图像处理研究。

E-mail: fmp0918@163.com

0 引言

红外成像仿真可以看作是在时间、空间、光谱以及辐射量等方面对景物的红外辐射分布、红外辐射在介质中的传播和在探测设备里能量转换过程的一种模拟。红外成像仿真技术并不要求仿真结果的辐射与景物的实际辐射完全相同, 它的目的是让计算机能模拟出红外成像的等价效果。因此, 利用计算机进行红外成像仿真就必须从模拟景物自身的几何特征、红外辐射以及大气传输对景物红外辐射的作用等方面着手^[1]。

国外对目标红外仿真技术的研究起步较早。1987 年, J.Hinderer 提出目标可用多个三角形面元近似表示, 通过对三角形面元赋以相应的红外特性参数, 最终绘制出目标的红外图像^[2]。同年, Gerhat 提出了一种模块化计算模型, 该模型除了能够模拟目标和背景的红外辐射图像外, 还可以模拟大气衰减、探测器噪声效应等效果^[3]。1996 年, 美国的 Georgia 技术研究所开发出一台能够生成高准确度红外场景图像的仿真系统^[4]。1999 年, 美国空军研究实验室研制出了可以对目标背景进行高分辨率红外仿真的 IRMA 5.0 版本^[5]。

目前, 发达国家在红外仿真技术领域已经遥遥领先。国内对红外仿真的研究起步较晚, 但是发展迅速。从“七五”计划开始, 国内一些研究机构开始对典型地面背景的红外辐射特性进行研究并取得了不错的成绩。

但是迄今为止, 国内对红外成像仿真的研究还停留在个人以及小组层面上, 仍然没有一套能够用于红外仿真的成熟系统^[6]。

本文对地面坦克目标的红外仿真方法进行了研究。通过综合考虑目标辐射、背景辐射和大气程辐射的作用, 开发出了能够实时生成红外图像的全数字红外成像仿真软件。该仿真软件具有计算量小、实时性高、交互性好和易于操作等优点。

1 目标的红外辐射模型

每个单元表面的热辐射包括两个部分: 目标自身的热辐射以及目标表面反射的外界辐射。

1.1 自身辐射

坦克的结构复杂, 在这里将其简化为三部分: 炮筒、车身和车轮履带, 并考虑坦克静态时的红外辐射模型。利用 OpenGL 建立目标模型, 考虑到目标与背景之间的相互作用, 借助 ANSYS 软件求解目标温度场的分布。在计算出目标温度分布之后, 利用普朗克辐射定律计算出目标的零视距红外辐射分布, 其计算公式为

$$E_{\lambda_1 \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) \frac{c_1}{\lambda^5 \exp(\frac{c_2}{\lambda T}) - 1} d\lambda \quad (1)$$

式中, $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 是第一辐射常数; $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 为第二辐射常数; T 为物体的绝对温度, 单位为 K ; $\varepsilon(\lambda, T)$ 是单元表面的发射率, 与波长 λ 和温度 T 有关; λ_1 和 λ_2 是红外波段辐射积分的上下限。

1.2 反射辐射

目标表面的反射辐射主要包括对太阳辐射、天空辐射和地面背景辐射的反射等^[7], 具体的计算公式为

$$E_{sf}^{infra} = \rho_{sun}^{infra} \cdot q_{sun}^{infra} + \rho^{infra} \cdot (q_{sky}^{infra} + q_{grd}^{infra} + \sum_{j=1}^N q_j^{infra}) \quad (2)$$

式中, ρ^{infra} 是单元表面在红外波段的反射率; ρ_{sun}^{infra} 是单元表面在红外波段对太阳辐射的反射率; q_{sun}^{infra} 是目标单元表面接收到的红外波段下的太阳辐射; q_{sky}^{infra} 是目标单元表面接收的红外波段下的天空辐射; q_{grd}^{infra} 是单元表面接收的红外波段下的地面背景辐射; $\sum_{j=1}^N q_j^{infra}$ 是单元表面接收的其他表面辐射的红外辐射能量的总和, N 代表面元的总数。在这里, 忽略 $\sum_{j=1}^N q_j^{infra}$ 的作用。

1.2.1 太阳辐射

太阳辐射包括太阳的直接辐射和太阳的散射辐射, 它随季节、时间、地理条件和大气条件的变化而变化^[8]。

单元表面接收的太阳直射辐射的计算公式为

$$q_{sd} = I_0 P^m \sinh \cos \theta + I_0 P^m \cosh \sin \theta \quad (3)$$

式中, I_0 为太阳常数, 其值为 1353 W/m^2 , P 为该地区某时的大气透明度, $m = 1/\sinh$, 为大气质量, h 代表太阳的高度角, 它由日期和地理条件共同决定; θ 代表单元表面的倾斜角, 当表面为水平面时, $\theta = 0^\circ$ 。

单元表面接收的太阳散射辐射的计算公式为

$$q_{sr} = \frac{1}{2} I_0 \cdot \sinh \cdot \frac{1 - P^m}{1 - 1.14 \ln P} \cos^2 \frac{\theta}{2} \quad (4)$$

单元表面接收的地面反射太阳辐射的计算公式为

$$q_{sf} = \rho_g (I_0 P^m \sinh + \frac{1}{2} I_0 \cdot \sinh \cdot \frac{1 - P^m}{1 - 1.14 \ln P}) (1 - \cos^2 \frac{\theta}{2}) \quad (5)$$

单元表面接收的总的太阳辐射为

$$q_{sun}^{infra} = q_{sd} + q_{sr} + q_{sf} \quad (6)$$

观察以上公式可发现, 当表面为水平面时, 单元表面接收的地面反射太阳辐射值等于 0, 此时只需要考虑太阳直射辐射和太阳散射辐射。

1.2.2 大气长波辐射

太阳辐射在经过大气层到达表面的过程中, 约有 10% 的能量会被大气中的水蒸气和二氧化碳吸收。同时, 大气中的水蒸气和二氧化碳也会吸收地面辐射。大气温度升高时会向外辐射出长波辐射。在晴天时, 大气长波辐射的计算表达式为 [7]

$$q_{sky}^{infra} = \varepsilon \sigma T_a^4 (a + b \sqrt{e'_a}) \quad (7)$$

式中, ε 为大气发射率; a 、 b 是经验常数, $a=0.61$, $b=0.05$; σ 是斯蒂芬-波尔兹曼常数, $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, e'_a 是近地面层水汽压, 它是大气气温 T_a 和相对湿度 RH 的函数。

$$e'_a = RH \cdot 0.61078 \cdot \exp(17.269 \cdot \frac{T_a - 273.15}{T_a - 35.19}) \quad (8)$$

在有云覆盖的情况下, 需要考虑云对大气长波辐射的影响, 修正后的计算表达式为

$$q_{sky}^{infra'} = (1 + c \times cc^2) \times q_{sky}^{infra} \quad (9)$$

式中, c 的值由云的类型决定, cc 为云的覆盖率 (0.2~0.04 之间)。

考虑大气透过率, 则最终的大气长波辐射值为 $q_{sky}^{infra'} \times \tau$ 。

1.2.3 地面背景辐射

地面背景辐射除了地面自身的热辐射之外, 还包括地面对环境辐射的反射。因此, 目标接收的地面背景辐射为地面自身热辐射和地面的反射辐射之和, 其具体的计算表达式为

$$E_{ground} = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 \exp(\frac{c_2}{\lambda T}) - 1} d\lambda + \rho^{infra} \cdot (q_{sky}^{infra} + q_{sun}^{infra}) \quad (10)$$

式中, ρ^{infra} 是地表表面在红外波段的反射率; q_{sun}^{infra} 是地表表面接收到的红外波段下的太阳辐射, 计算公式如式 (6); q_{sky}^{infra} 是地表表面接收的红外波段下的天空辐射, 计算表达式如式 (7)。

2 地面的红外辐射模型

地面辐射主要由两部分组成: 地面反射的辐射强度和地面自身的热辐射强度。地面自身的热辐射强度为

$$E_{ground-self}^{infra} = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 \exp(\frac{c_2}{\lambda T}) - 1} d\lambda \quad (11)$$

ε 代表地表发射率, 其他物理量的意义同式 (1)。

地面反射辐射主要包括地表对太阳辐射和天空辐射的反射 [9], 地表反射辐射的计算表达式为

$$E_{ground-sf}^{infra} = \rho^{infra} \cdot (q_{sky}^{infra} + q_{sun}^{infra}) \quad (12)$$

因此, 地面的总辐射强度 E_{ground} 为地面自身热辐射强度 $E_{ground-self}^{infra}$ 和地面反射辐射 $E_{ground-sf}^{infra}$ 之和。

3 大气传输模型

目标场景的红外辐射经过大气传输到探测器表面, 因而探测器表面接收的红外辐射强度是目标场景零视距的红外辐射强度以及大气衰减共同作用的结果。本文中, 使用 MODTRAN 软件建立大气传输模型, 计算得到大气的平均透过率和大气程辐射。

4 场景渲染

红外图像本质上是灰度图像, 因此可见光图像的红外仿真需将目标的辐射亮度转化为灰度值。红外探测器表面接收的的实际的目标辐射量亮度为

$$L_{\text{sensor}} = L_{\text{path}} + \tau(L_{\text{self}} + L_{\text{reflect}}) \quad (13)$$

式中, L_{sensor} 为探测器接收的目标红外辐射; L_{path} 为大气程辐射, 主要来自目标与探测器之间大气自发产生的热辐射和大气对太阳辐射的

散射^[10]; L_{self} 为目标自身的热辐射; L_{reflect} 为目标表面反射的红外辐射。

在红外图像中, 我们注重的是目标之间以及目标与背景之间的灰度反差, 即相对灰度值, 因此灰度范围的设定至关重要。设灰度的下限为 $G_{\min}$, 对应图像帧中的最低辐射亮度 $L_{\min}$; 设灰度的上限为 $G_{\max}$, 对应图像帧中的最高辐射亮度 $L_{\max}$, 由此, 可以计算接收辐射亮度值为 R 的面元的灰度值^[11]:

$$G = \frac{L - L_{\min}}{r} + G_{\min} \quad (14)$$

式中, $r = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{G_{\max} - G_{\min}}$, 代表每级灰度级对应的辐射间隔。

利用式 (14) 得到量化的灰度级, 将其赋给目标的各个面元, 便可获得目标的红外模拟图像。

5 仿真流程及实验结果分析

5.1 仿真流程

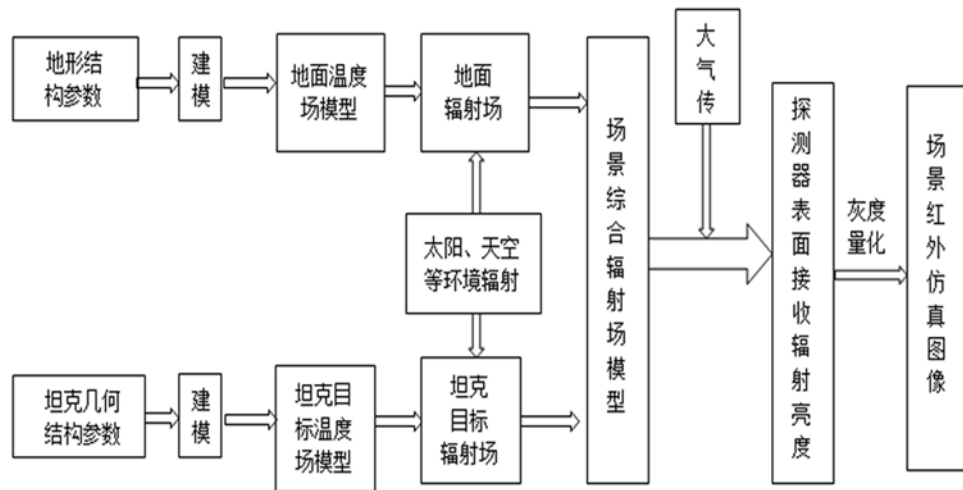


图 1 系统仿真流程图

地面坦克目标红外仿真系统的流程如图 1 所示。对于目标红外成像仿真, 利用 OpenGL 绘制物理模型, 然后用 ANSYS 软件求解目标的温度场分布, 利用普朗克公式计算目标的红外辐射分布。对于地面红外成像仿真, 假设地面是均匀分布平坦的理想地表, 综合太阳辐射、天空辐

射以及地表自身辐射等来构建地表辐射模型, 采用合适的数学模型计算地表的红外辐射亮度。通过将目标和地表的辐射分布叠加, 构成场景综合辐射场信号; 然后根据场景与视点间的大气条件, 利用大气传输模型计算辐射亮度的衰减量, 从而得到最终成像在探测器表面的辐射亮度; 将

辐射数据灰度量化生成场景的红外仿真图像。

5.2 实验结果与分析

采用文中所属的计算模型,在仿真软件平台上实时生成坦克目标的红外图像,图 2~图 7 是红外仿真结果的部分截图。

图 2 是不考虑背景和大气因素且炮筒、车身、轮子的温度分别为 310 K、301 K、315 K 时坦克的零视距红外仿真效果图。图 3、图 4、图 5 和图 7 都是今年 7 月 21 日上午 9:00 在北京测试时获得的。图 6 是今年 7 月 21 日下午 18:00 在北京测试时获得的。对比图 2 和图 3 可看到,添加背景辐射后目标的整体亮度得到了提升,背景的辐射亮度一般情况下比常温下坦克的辐射亮度数值大很多,可见背景辐射是坦克红外仿真中不可忽略的因素。对比图 3 和图 4 可以发现,大气对目标辐射亮度有削弱作用,探测器接收的辐射变少,目标的整体灰度变暗。将图 4 分别与图 5、图 6 和图 7 对比可以看出,本系统可以仿真得到不同波段、不同时刻以及不同大气条件下的红外图像。这也验证了系统的实时性。

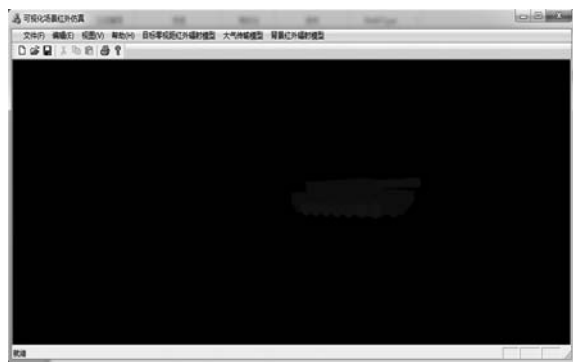


图 2 目标零视距红外仿真图 ($8\sim 14\ \mu\text{m}$)



图 3 无云雨天气上午 9 时的场景红外仿真 ($8\sim 14\ \mu\text{m}$)



图 4 无云雨天气上午 9:00 的场景红外仿真 (考虑大气衰减作用, $8\sim 14\ \mu\text{m}$)



图 5 无云雨天气上午 9:00 的场景红外仿真 (考虑大气衰减作用, $3\sim 5\ \mu\text{m}$)



图 6 无云雨天气在下午 18:00 的场景红外仿真 (考虑大气衰减作用, $8\sim 14\ \mu\text{m}$)

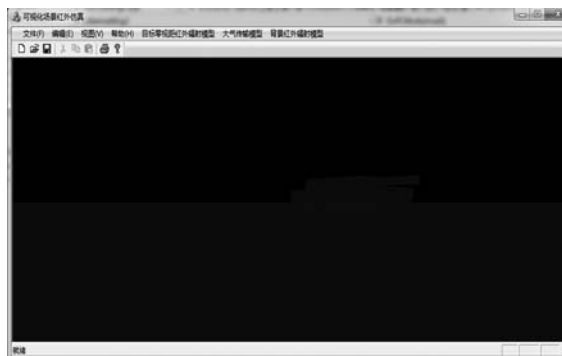


图 7 暴雨天气 (75.0 mm/h) 在上午 9:00 的场景红外仿真 (考虑大气衰减作用, $8\sim 14\ \mu\text{m}$)

6 结论

基于 OpenGL 库和 Visual Studio 2012 软件平台开发了红外仿真系统, 着重讨论了地面坦克目标场景的红外仿真。仿真结果表明, 该系统的实时性强, 操作简便易上手, 且交互性强, 能够实时将大气参数和背景辐射参数显示在操作界面上以供用户参考。因此, 该仿真系统为红外成像系统的评估测试提供了可靠的参考依据。

参考文献

- [1] 贾建科, 张麟兮, 郑春来. 基于 Vega 的场景红外成像仿真研究 [J]. **红外技术**, 2006, **28**(3): 174-177.
- [2] Hinderer J. Model For Generating Synthetic Three-Dimensional(3D) Images Of Small Vehicles[C]. Proceedings of SPIE on Infrared Sensors and Sensor Fusion, 1987, **782**: 9-12.
- [3] Gerhart G, Martin G, Gonda T. Thermal Image Modeling[C]. Proceedings of SPIE on Infrared Sensors and Sensor Fusion, 1987, **782**: 9-12.

(上接第 17 页)

提取出了目标区域, 然后在 HSI 空间中分别对初步彩色融合图像的 H、S、I 分量进行了调整, 并得到了最终的彩色融合图像。实验结果表明, 本文方法得到的彩色融合图像具有目标与背景对比度高、细节丰富、色彩较好等特点, 可提高人眼对场景的理解和对目标的快速识别。

参考文献

- [1] Toet A. Natural Colour Mapping for Multiband Nightvision Imagery [J]. *Information Fusion*, 2003, **4**(3): 155-166.
- [2] 何永强, 周云川, 仝红玉, 等. 基于 YCBCR 空间颜色传递的融合图像目标检测算法 [J]. **红外技术**, 2011, **33**(6): 349-353.

- [4] Cathcart J M, Faust N L. High-fidelity Infrared Scene Simulation at Georgia Tech[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1996, **2740**: 142-152.
- [5] Owens M A, Wellfare M R. Irma 5.0 Multisensor Signature Prediction Model[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2000, **3699**: 249-267.
- [6] 梁欢. 地面背景的红外辐射特性计算及红外景象生成 [D]. 南京理工大学, 2009.
- [7] 宣益民, 韩玉阁, 蔡兰波. 地面目标与背景的红外特征 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [8] 王章野, 陆艳青, 彭群生, 等. 基于气象学和传热学的城市建筑物红外成像模型 [J]. **系统仿真学报**, 2000(05): 517-523.
- [9] 陈珊, 孙继银. 自然地表红外成像仿真模型 [J]. **红外技术**, 2008(09): 537-540.
- [10] 王超范. 一种地面场景动态红外仿真方法研究 [D]. 西安电子科技大学, 2009.
- [11] 娄树理, 周晓东. 基于 OpenGL 实时红外视景仿真研究 [J]. **计算机仿真**, 2005(02): 167-170.

- [3] 赵向文, 靳国旺, 许竞轩, 等. 基于多阈值大津法直方图分割的 SAR 数据伪彩色量化方法 [J]. **测绘科学技术**, 2012, **29**(6): 445-449.
- [4] 殷松峰, 曹良才, 杨华, 等. 提高夜视融合目标可探测性的颜色对比度增强方法 [J]. **红外与毫米波学报**, 2009, **28**(4): 281-284.
- [5] 杨少魁, 刘文. 一种微光与红外图像彩色融合方法 [J]. **红外与激光工程**, 2015, **43**(5): 1654-1659.
- [6] 薛模根, 刘存超, 周浦城. 基于颜色传递和对比度增强的夜视图像彩色融合 [J]. **红外与激光工程**, 2014, **35**(6): 864-868.
- [7] 曾祥通, 张玉珍, 孙佳嵩, 等. 颜色对比度增强的红外与可见光图像融合方法 [J]. **红外与激光工程**, 2015, **44**(4): 1198-1202.