

红外多光谱仿真中的建筑物间辐射影响研究

李 波^{1,2,3,4,5}, 赵怀慈^{1,3,4}, 花海洋^{1,3,4}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 4. 辽宁省图像理解与视觉计算重点实验室,
辽宁 沈阳 110016; 5. 沈阳工程学院 信息学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘 要: 为了对建筑物间相互辐射影响的重要性进行评估, 为多光谱仿真方法和 ATR 算法的研究提供理论支持, 在 3~5 μm 和 8~12 μm 两个波段分别进行了研究, 并建立了建筑物间相互辐射影响的计算模型。当存在太阳直接辐射时, 建筑物相互间的辐射影响在 3~5 μm 波段可以忽略不计, 而在 8~12 μm 波段相互影响明显, 不能被忽略。建立了有两个冷却塔的虚拟场景, 选取了 8、9、10、11、12 μm 为研究波长, 针对冷却塔间的相互辐射影响进行了数值模拟计算, 其中 8、9、10 μm 三个波长的相互辐射影响较大, 超过了总体辐射能量的 10%, 而 11 μm 和 12 μm 相对较小。对冷却塔间的辐射影响进行了场景仿真, 仿真结果体现了不同波长的辐射影响随辐射距离的变化情况。

关键词: 多光谱仿真; 辐射影响; ATR

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3222-06

Radiation influence research between buildings in IR multispectral simulation

Li Bo^{1,2,3,4,5}, Zhao Haici^{1,3,4}, Hua Haiyang^{1,3,4}

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Optical-Electronics Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 4. Key Laboratory of Image Understanding and Computer Vision, Shenyang 110016, China; 5. Information College, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China)

Abstract: In order to evaluate the importance of the radiation influence between buildings and provide theoretical support for the infrared multispectral simulation method and ATR algorithm research, some research in waveband 3–5 μm and 8–12 μm was done and a radiation influence calculation model between buildings was built in this paper. When the direct solar radiation existed, it was not necessary to consider the radiation influence between buildings in 3–5 μm , because the influence was tiny enough to be ignored, while it should not be ignored in 8–12 μm because of the apparent influence. A virtual scene with two cooling towers was build and the radiation in 8 μm , 9 μm , 10 μm , 11 μm and 12 μm were

收稿日期: 2014-02-10; 修订日期: 2014-03-15

基金项目: 国防 973 科研课题

作者简介: 李波(1980-), 男, 博士生, 主要研究方向为虚拟现实与仿真技术。Email: leebo@sia.cn

导师简介: 赵怀慈(1974-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为虚拟现实。Email: hczhao@sin.cn

花海洋(1978-), 男, 副研究员, 硕士, 研究方向为 ATR 仿真技术。Email: huahy@sia.cn

selected to calculate the radiation influence between the cooling towers. According to the result, the radiation influence in $8\ \mu\text{m}$, $9\ \mu\text{m}$ and $10\ \mu\text{m}$ is greater than 10%, while that in $11\ \mu\text{m}$ and $12\ \mu\text{m}$ was smaller. The scene simulation for the radiation influence between the cooling towers is done, which shows the radiation influence at different wavelength with the changes of radiation distance.

Key words: multispectral simulation; radiation influence; ATR

0 引言

伴随着红外成像技术的趋于成熟^[1],多光谱成像技术成为新一代光电探测技术,红外多光谱仿真技术也随之成为军事应用的研发热点^[2]。与传统的红外成像技术相比,红外多光谱成像技术采集的图像能够形成数据立方体,某个波段的仿真图像可由图像立方体内该波段内的多幅仿真图像通过组合获得。显然,红外多光谱图像可以提供比传统仿真图像更高的精度,但是其合成图像的逼真度更依赖于图像立方体中每幅图像的逼真度。因此需要保证图像立方体中图像的逼真度。此外,在通过仿真方法对自动目标识别(Automatic Target Recognition,ATR)算法进行验证的过程中,提高目标辐射特性的逼真度对于算法的验证具有重要意义。

1 传统仿真方法

在对场景中的特定目标进行多光谱红外辐射情况仿真时,主要考虑因素为目标在每个波段自身辐射、太阳辐射和背景辐射三方面的影响,而背景辐射主要包含地面辐射和大气辐射两部分。除非与目标距离很近而且温差很大,例如装甲车与地面^[3],目标与场景中的其他建筑物的相互影响一般不予考虑。即探测器测到的目标在 λ 波段的最终辐射亮度为 L_{obj} 。

$$L_{obj}(\lambda) = L_{self}(\lambda) + L_{rsun}(\lambda) + L_{rground}(\lambda) + L_{rground}(\lambda) + L_{rsky}(\lambda) \quad (1)$$

式中: $L_{self}(\lambda)$ 为目标的自身辐射亮度; $L_{rsun}(\lambda)$ 为目标对太阳直接辐射在 λ 波段的反射; $L_{rground}(\lambda)$ 为目标对地面辐射在 λ 波段的反射; $L_{rsky}(\lambda)$ 为目标对大气辐射在 λ 波段的反射。太阳直接辐射、地面辐射和大气辐射可由 Modtran^[4]和 Cart^[5]计算获得。

探测器探测到的目标在 (λ_1, λ_2) 波段范围内的总的辐射亮度为:

$$L_{obj}(\lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} L_{obj}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

在一般情况下,这样的计算方法是没问题的,其仿真结果与实测的红外图像高度接近。但是在特定情况下,比如目标周围存在温度较高的建筑时,仿真结果与实测图像会存在较大偏差,此时需要特殊考虑周围建筑的辐射对于目标的影响。文中在红外多光谱仿真的基础上,对相邻建筑间的辐射影响情况进行研究,为多光谱仿真方法和 ATR 算法研究提供相关影响因素的理论支持。

2 相互影响的必要性

2.1 虚拟场景建立

为方便研究周围建筑对目标辐射情况的影响,设定场景如图 1 所示:相邻两座冷却塔,高 140 m,底面直径 120 m,相互间隔 60 m。左侧冷却塔命名为 A,右侧冷却塔命名为 B。设定两座冷却塔表面温度为 300 K,比周围建筑物的温度明显要高一些。当以冷却塔 A 为探测目标时,对冷却塔 B 对冷却塔 A 的辐射影响情况进行研究。

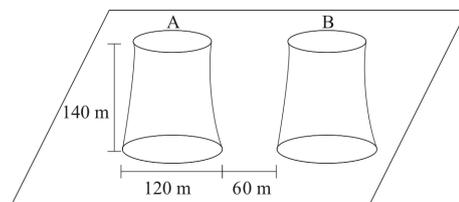


图 1 虚拟场景

Fig.1 Virtual scene

2.2 透过率因素

建筑物间相互辐射影响的最基本因素为大气辐射透过率。若透过率很低,则表示相互间的辐射仅有小部分能量能投射到相邻建筑物上,此时可不考虑

相互间的辐射影响。在中波红外和长波红外范围内,辐射的大气透过率相对较高,建筑物相互间辐射的传输损耗很小,其辐射能量大部分投射到相邻建筑物上,足以影响红外成像的效果,此时需要考虑建筑物间的相互辐射影响。以 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 为例,在不考虑气溶胶的气象条件下,以 $0.015\ \mu\text{m}$ 为波长间隔取样,由 Modtran 计算获得的建筑物对周围 $10\sim 120\ \text{m}$ 范围内的辐射透过率如图 2 所示,图中每一条曲线都对应一个波长的透过率。可见除了少数几个波段,绝大多数波段在 $120\ \text{m}$ 范围内的透过率在 0.8 以上。在冷却塔 A 和冷却塔 B 相距 $60\ \text{m}$ 的情况下,其在红外波段相互间辐射的透过率基本在 0.9 以上。

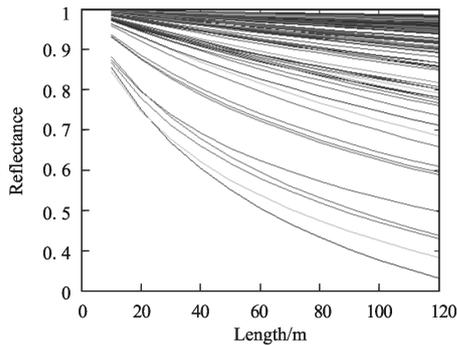


图 2 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段的透过率

Fig.2 Reflectance in $8\sim 12\ \mu\text{m}$

2.3 目标自身辐射所占比重

在红外成像的四个主要影响因素中,目标自身辐射和太阳直接辐射是最重要的两个影响因素。在红外成像过程中,如果太阳辐射占主要地位,而目标自身辐射远小于太阳辐射的影响,那么此时无需考虑建筑物相互间的辐射影响;如果目标自身辐射占有重要地位,那么建筑物相互间的辐射影响也随之变得重要,不能被忽略。由此可知,当不存在太阳直接辐射时,目标自身的辐射是红外探测器能量的主要来源,因此应当考虑建筑物间相互辐射影响。

在太阳直接辐射存在的情况下,在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 两个波段分别对建筑物互辐射和太阳直接辐射进行分析,以确定是否需要考虑相互间辐射影响,所有数据均由 Modtran 计算获得。

(1) 在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段

以 7 月的美国标准大气为例,在不考虑云和气溶胶影响的情况下,太阳直接辐射情况如图 3 所示。

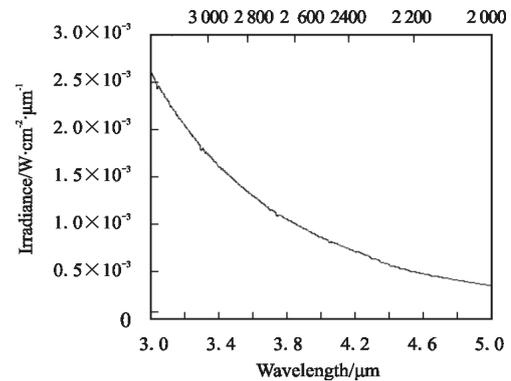


图 3 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段太阳直接辐射

Fig.3 Solar direct radiation in $3\sim 5\ \mu\text{m}$

表面温度 $300\ \text{K}$ 的黑体其辐射情况如图 4 所示。

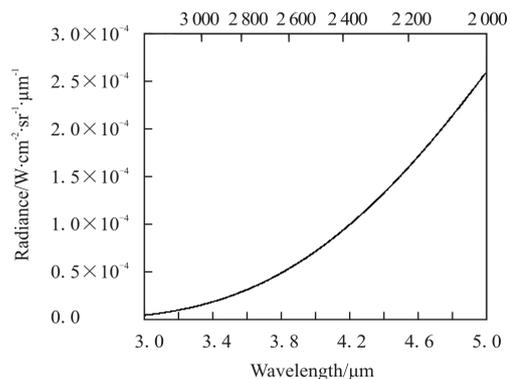


图 4 黑体在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的辐射情况

Fig.4 Self-radiation of black body in $3\sim 5\ \mu\text{m}$

根据 Modtran 计算的 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段范围内表面温度为 $300\ \text{K}$ 黑体的自身辐射情况和太阳直接辐射强度对比可见,在该波段,太阳直接辐射强度是黑体自身辐射强度的几倍到几十倍,此时对于红外成像传感器而言,其主要能量来源为目标对太阳直接辐射的反射,目标自身辐射所占比重较小。这种情况下,冷却塔相互间的辐射影响可不考虑。

(2) 在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段

以 7 月的美国标准大气为例,在不考虑云和气溶胶的情况下,太阳直接辐射强度如图 5 所示。

根据 Modtran 计算的 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段范围内表面温度为 $300\ \text{K}$ 的黑体的自身辐射情况和太阳直接辐射强度对比可见,在该波段,目标自身辐射是太阳辐射能量的几倍到几十倍。对于红外成像传感器而言,目标自身辐射居于主要地位,此时应该考虑相邻冷却塔间的相互影响。

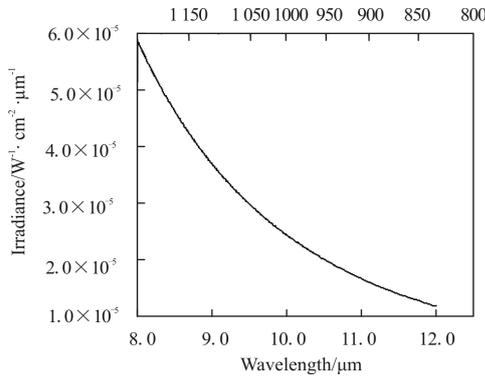


图 5 8~12 μm 波段太阳直接辐射
Fig.5 Solar direct radiation in 8~12 μm

表面温度 300 K 的黑体其辐射情况如图 6 所示。

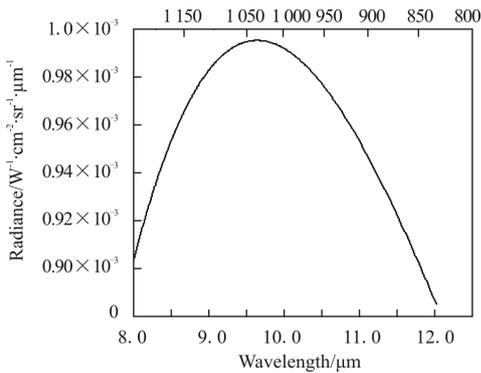


图 6 黑体在 8~12 μm 波段的辐射情况
Fig.6 Self-radiation of black body in 8~12 μm

3 场景仿真实验

3.1 数值计算

以冷却塔 A 为红外探测对象, 其受到冷却塔 B 的辐射影响。不考虑从冷却塔 A 到红外探测器之间的大气损耗, 仅对冷却塔 A 的辐射情况进行研究, 则探测器探测到的冷却塔 A 在 λ 波段的辐射亮度 $L_{A\ detect}(\lambda)$ 为:

$$L_{A\ detect}(\lambda) = L_{A\ self}(\lambda) + L_{A\ rsun}(\lambda) + L_{A\ rground}(\lambda) + L_{A\ rsky}(\lambda) + L_{A\ rB}(\lambda) \quad (3)$$

式中: $L_{A\ self}(\lambda)$ 为冷却塔 A 在 λ 波段的自身辐射亮度; $L_{A\ rsun}(\lambda)$ 为冷却塔 A 对太阳直接辐射的反射; $L_{A\ rground}(\lambda)$ 为冷却塔 A 对地面辐射的反射; $L_{A\ rsky}(\lambda)$ 为冷却塔 A 对天空辐射的反射, $L_{A\ rB}(\lambda)$ 为冷却塔 A 对冷却塔 B 的辐射的反射。

探测器探测到的冷却塔 A 在某一个波段 (λ_1, λ_2) 范围内的辐射亮度为:

$$L_{A\ detect}(\lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} L_{A\ detect}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

设定冷却塔表面温度为 300 K, 则冷却塔 A 在 λ 波段的自身辐射亮度 $L_{A\ self}(\lambda)$ 可由普朗克黑体辐射公式计算获得:

$$L_{A\ self}(\lambda) = 2hc^2 / \lambda^5 (e^{hc/\lambda kT}) \epsilon(\lambda) \quad (5)$$

式中: h 为普朗克常数; k 为玻耳兹曼常数; c 为光速; T 为热力学温度, 单位为 K; $\epsilon(\lambda)$ 为冷却塔 A 对波长为 λ 的辐射的发射率。

冷却塔 A 对于冷却塔 B 的辐射的反射 $L_{A\ rB}(\lambda)$ 涉及到冷却塔 B 的自身辐射强度、从冷却塔 B 到冷却塔 A 之间的路径损耗以及冷却塔 A 对于冷却塔 B 的辐射的反射几部分, 即

$$L_{A\ rB}(\lambda) = L_B(\lambda) \alpha_{AB}(\lambda) \rho_A(\lambda) \quad (6)$$

式中: α_{AB} 为冷却塔 B 到冷却塔 A 之间的透过率, 用以表示冷却塔 B 的辐射传输到冷却塔 A 的路径损耗; $\rho_A(\lambda)$ 为冷却塔 A 对波长为 λ 的辐射的反射率, $L_B(\lambda)$ 为冷却塔 B 在 λ 波段的辐射亮度, 其均与冷却塔的表面材质有关。设定冷却塔的组成材质为建筑用水泥混凝土, 则从美国喷气推进实验室 (JPL) ASTER Spectral Library 数据库^[6]获取的该材质 8~12 μm 范围内的反射率如图 7 所示。由于建筑水泥的透过率为 0, 可由反射率推知建筑水泥混凝土在对应波段的发射率。

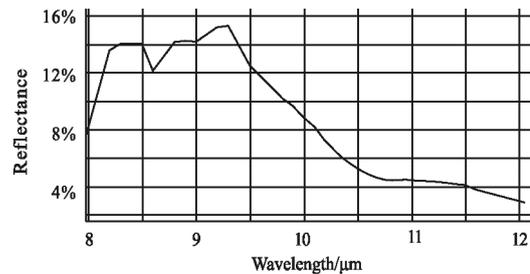


图 7 8~12 μm 波段建筑水泥的反射率
Fig.7 Reflectance of construction concrete in 8~12 μm

3.2 数据分析

在红外多光谱图像仿真中, 需要对冷却塔 A 在每个波长颗粒的辐射和反射情况分别求解以形成数据立方体。随着波长粒度的减小, 该过程的计算量无限增大。为简化研究过程, 选取 8~12 μm 波段为研究波段, 8 μm、9 μm、10 μm、11 μm 和 12 μm 为研究

波长,去除大气和地面辐射影响,对冷却塔 B 对冷却塔 A 的辐射影响进行分析。

五个选定波段在 120 m 范围内的透过率情况如图 8 所示,可见除波长为 11 μm 的辐射其透过率从 0.99 随距离下降至 0.87 外,其他辐射的透过率都是 0.96 以上。由于透过率的分布随辐射距离呈线性分布,由此可拟合出在 120 m 范围内任意距离的辐射透过率。

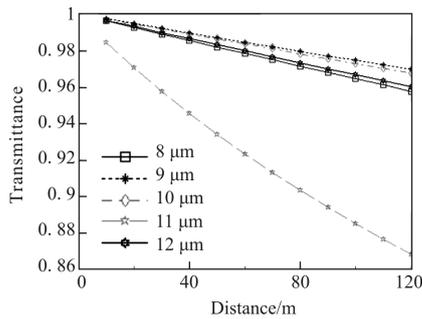


图 8 选定波段的透过率

Fig.8 Transmittance of the selected wavelengths

各研究波段冷却塔 A 对于冷却塔 B 的辐射的反射 $L_{A/B}(\lambda)$ 、冷却塔 A 的自身辐射 $L_{Aself}(\lambda)$ 以及探测器探测到的冷却塔 A 的辐射情况 $L_{Adetect}(\lambda)$ 间的相互关系如图 9 所示。

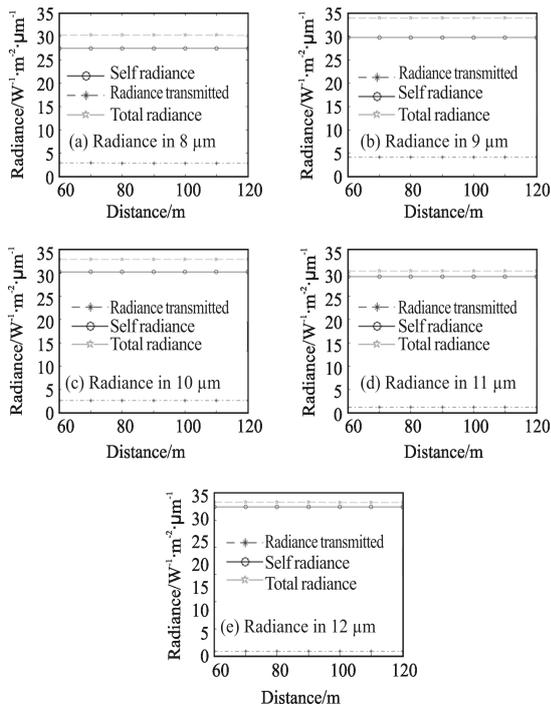


图 9 各波段的相互影响能量与自身辐射能量对比情况

Fig.9 Radiation influence compared with self-radiation

图中的星型虚线表示冷却塔 A 对于冷却塔 B 的辐射的反射,圆形实线表示冷却塔 A 表面的自身辐射,五角星型虚线表示探测器探测到的冷却塔 A 的总体辐射。

可见冷却塔 B 对冷却塔 A 的辐射对最终探测的辐射强度影响在 8 μm 、9 μm 、10 μm 三个波段比较明显,均有超过 10% 的影响幅度,而在 11 μm 、12 μm 两个波段影响相对较小,分别约为 4% 和 2%。通过对 8~12 μm 波段以 0.015 μm 为波长间隔形成的数据立方体分析统计可知,绝大部分波长的辐射影响在 10% 左右。对于多光谱仿真而言,10% 的影响幅度对合成仿真图像的逼真度具有重大影响;而对于 ATR 算法研究而言,10% 的辐射影响对于模版匹配成功率的影响更是不可忽视。

3.3 场景仿真

对冷却塔 A 对冷却塔 B 辐射的反射在 8~12 μm 波段范围内进行仿真,其中 $\lambda=8 \mu\text{m}$ 的仿真图像如图 10(a)所示,其能量分布如图 10(b)所示。 $\lambda=9 \mu\text{m}$ 的相关仿真图像和能量分布如图 10(c)(d)所示。可见冷却塔 A 最右侧的亮度最大,因为其距离冷却塔 B 最近。随着冷却塔 A 距离冷却塔 B 距离的增大,亮度逐渐降低。由于冷却塔 A 左侧不能接收到冷却塔 B 的辐射,因此其亮度为 0。

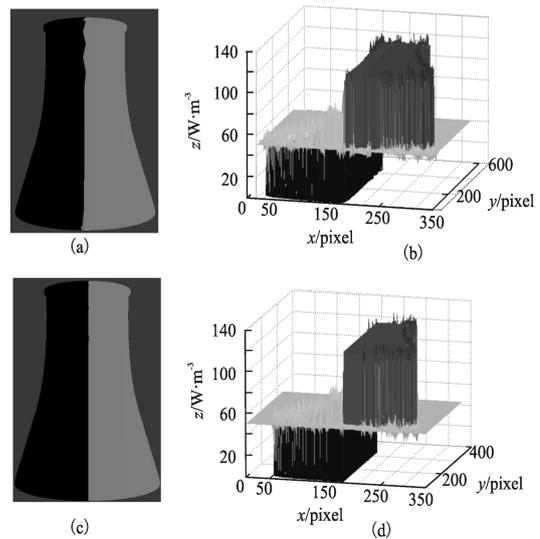


图 10 辐射影响仿真图像

Fig.10 Simulation images of radiation influence

4 结束语

文中在 3~5 μm 和 8~12 μm 两个波段对建筑物

间相互辐射影响的重要性进行了研究,并建立了建筑物间相互辐射影响的计算模型。通过 Modtran 计算的数据证实在太阳直接辐射存在的情况下,在 3~5 μm 波段可不考虑建筑物间的相互影响,而在 8~12 μm 波段需要考虑。建立了具有两个冷却塔的虚拟场景,通过对冷却塔间在 8~12 μm 波段范围内的相互辐射影响的数值计算,证实了相邻建筑物间相互辐射影响的重要性。通过 8~12 μm 范围内冷却塔间相互辐射影响的场景仿真,验证了辐射影响计算模型的正确性。

参考文献:

- [1] Fan Jinxiang, Yue Yanjun. Development and applications of real-time infrared imaging scene generation technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1601-1608. (in Chinese)
范晋祥,岳艳军. 实时红外成像场景生成技术的发展及应用[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1601-1608.
- [2] Xu Hong, Wang Xiangjun. Applications of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 13-17. (in Chinese)
许洪,王向军. 多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 13-17.
- [3] Han Yuge, Cheng Zhiduo, Ren Dengfeng, et al. Thermal interactions and infrared simulation of armored vehicles and ground background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 20-25. (in Chinese)
韩玉阁,成志铎,任登凤,等. 装甲车辆与地面背景的热交互作用及红外仿真[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 20-25.
- [4] Acharya P K, Berk A, Anderson G P, et al. MODTRAN: multiple scattering and bi-directional reflectance distribution function upgrads to MODTRAN [C]// Proc of SPIE Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III, 1999, 3756: 354-362.
- [5] Dai Congming, Wei Heli, Chen Xiuhong. Validation of atmospheric scattering radiance calculated by combined atmospheric radiance transfer (CART) code [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1576-1581. (in Chinese)
戴聪明,魏合理,陈秀红. 通用大气辐射传输软件(CART)大气散射辐射计算精度验证 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1576-1581.
- [6] Baldrige A M, Hook S J, Grove C I, et al. The ASTER Spectral Library Version 2.0 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: 711-715.