针对复杂地形的热红外成像仿真研究

崔文煜[1],易维宁[1],乔延利[1],杜丽丽[1],刘 晓[2]

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室,安徽 合肥 230031;
2. 中国人民解放军电子工程学院,安徽 合肥 230037)

摘 要:红外热成像系统由于具有全天时观测能力而得到广泛应用。为了测试和评估高分辨率红外热成像系统的性能,需要大量多种成像条件下的热红外影像作为输入数据源。为获取真实可信的地面热红外仿真图像,提出了一种针对复杂地形的热红外成像模拟方法。该方法综合起伏地表的地形、光照、遮蔽和邻近地域辐射等因素,系统研究了三维地表热辐射的产生和传递机理。利用光学遥感影像和数字高程数据,生成了一天中不同时刻的地面热红外图像。结果表明:该方法生成的 24h 序列图像,符合实际地表热辐射场的日变化规律,从而为可见光图像制备红外基准图提供了一种有效途径。

关键词:热红外; 三维地形; 成像仿真

中图分类号:TP722.5 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2014)10-3205-06

Thermal infrared imaging simulation for complex terrain

Cui Wenyu[1], Yi Weining[1], Qiao Yanli[1], Du Lili[1], Liu Xiao[2]

(1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China)

Abstract: Infrared thermal imaging systems are widely applied with the ability of all time observation. In order to test and evaluate the performance of high-resolution infrared thermal imaging systems, a large number of thermal infrared images in different imaging conditions are needed as input data sources. To obtain credible thermal infrared simulated images of ground, a TIR imaging simulation method for complex terrain was proposed. Combined with factors of terrain, light, shadow and radiation from neighborhood on relief surfaces, the generation and transmission mechanism of thermal radiation on 3D terrain surface was studied systematically. Thermal infrared images of terrain surface on different time in a day were simulated by using optical remote sensing images and DEM data. The results indicate that, the TIR image sequences made by this method accord with the daily changing law of thermal radiation on ground, therefore, an effective way of producing IR reference images by visible images is provided.

Key words: thermal infrared; 3D terrain; imaging simulation

收稿日期:2014-02-05; **修订日期**:2014-03-15

基金项目:国家自然科学基金(41175037)

作者简介:崔文煜(1985-),男,博士生,主要从事遥感信息处理、红外场景仿真方面的研究。Email:wenyu19@mail.ustc.edu.cn

导师简介:易维宁(1956-),女,研究员,主要从事遥感图像处理方面的研究。Email:yiwn@aiofm.ac.cn

0 引 言

红外遥感由于具有全天时观测能力而得到广泛应用。为准确合理地设计传感器参数,需要分析评估大量的、不同成像条件下的红外图像。通过实验的方法获取不同条件的红外影像,成本巨大且难以实施,因此需要采取仿真的手段来获得图像。热红外成像仿真需要能准确模拟地表热辐射,以往的地表热辐射模型多是基于平坦地势的假设[1-3]。然而,真实地表起伏变化,地形因素严重影响了地表热红外辐射特性。文中基于一维导热数学模型,结合地形、光照、遮蔽和邻近地域辐射等因素,提出了针对三维地表的热辐射场模拟方法,并在此基础上,利用光学遥感影像和数字高程数据,生成了一天中不同时刻的地面热红外图像。

1 地形几何模型的建立

计算三维地表瞬态温度场及其红外辐射通量,需要考虑地形因素给地面辐射带来的影响,因此要建立地形几何模型,并进行地形网格划分。目前三维地形的建模方法主要有以下两种:一是基于分形的方法生成随机地形;二是基于真实地形数据生成天然地形。鉴于地形模型真实性的考虑,文中使用实际的数字地面高程模型(Digital Elevation Model,DEM)的数据来建立地表的三维几何模型。DEM 的数据格式参照了美国地质测量局(USGS)的格式。根据 DEM 点在平面域中的位置,把建模所用的所有 DEM 点进行多边形划分,得到平面域内的多边形网格;然后给平面域中的各点赋上相应的高程值,得到空间多边形网格,该网格可以近似描述地形表面。图 1 显示了由实际高程数据(分辨率 30 m)构造的三维地形,该图中心经纬度为(103.26°E,31.06°N),最低点海拔 1 457 m,最高点海拔 38 31 m;平均海拔为 2 393 m。

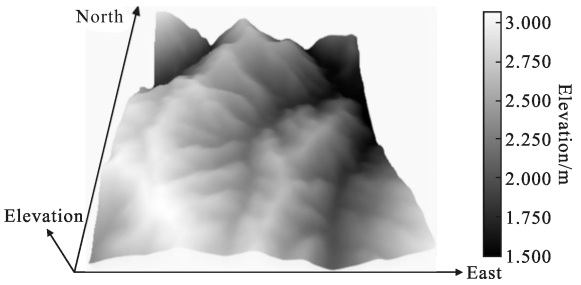


图 1 地形几何模型

Fig.1 Geometry model of terrain

为了计算地形因子和地表光照遮挡系数,需要对三维地形划分网格。一般文献中多采用结构性矩形网格[4]。由于计算域中四点不一定同处在一个平面,为了计算准确,文中采用三角形网格。图 2 中,ΔABC 是地形网格中的基本单元,它的三个顶点本别是高程数据中的相邻的三个像素点。X 轴和 Y 轴分别代表了地面经纬度坐标,Z 轴表示海拔高度。

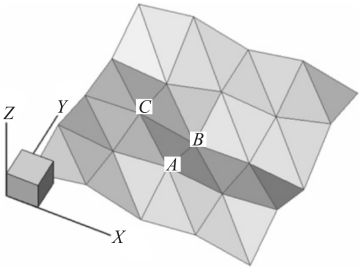


图 2 地形网格划分示意图

Fig.2 Schematic diagram of the terrain grid division

2 三维地表的热红外辐射模型

利用三维地形网格中包含的地理坐标和高程信息,可以计算其中每个三角面的太阳投影系数、太阳入射辐射和邻近地域辐射,将其带入地表热平衡方程,结合地表导热数学模型,求出地面温度及热辐射。由此建立的三维地表热红外辐射模型,它通过输入地表材质物性参数、气象条件和高程信息,估算某种地表一天中不同时刻的热红外辐射。三维地表的热辐射计算流程如图 3 所示。

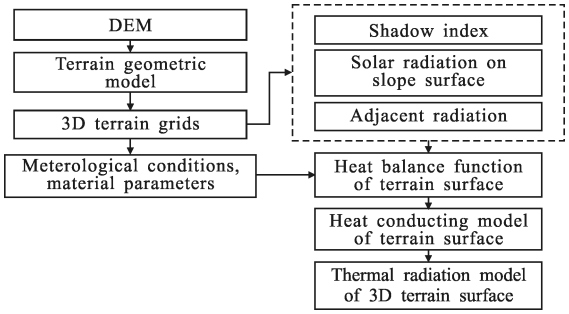


图 3 三维地表热红外辐射计算流程图

Fig.3 Flow chart of the thermal infrared calculation in earth's surface

2.1 地表一维瞬态导热数学模型

生成具有真实感的地面背景的红外热像,需要

能准确模拟地面背景的红外辐射特性。而温度是地面产生热辐射的基本因素。对于有地势起伏的地形,需要计算其三维温度场。温度的垂直梯度对地表温度场的影响最大,而水平方向的热流通量相对较小,可近似忽略不计。因此在计算地表导热问题时,可采用一维瞬态导热数学模型,可表达为微分方程如下:

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t}=\kappa\frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} \tag{1}$$

式中:热扩散系数 $\kappa=\lambda c/(\rho C)$,$m^2/s$。其中,$\lambda c$ 为导热系数,W/(m·K);C 为比热容,J/(kg·K);ρ 为密度,kg/m^3;z 为深度坐标,m;t 为时间,s。

利用有限差分法,对传热微分方程(见公式(1))进行解析,可以得到地表温度的时间序列。在地表内部某一深度处,温度可认为是常数。因此,公式(1)的下边界条件可取为某一恒温。由于地表直接暴露在空气中,与周围环境之间有着复杂的热量交换过程。因此,地表的上边界条件为:

$$Q_{sun}+Q_{sky}\pm H\pm LE-M_g-G=0 \tag{2}$$

式中:Q_{sun} 为地面单位面积所吸收的太阳短波辐射;Q_{sky} 为地面单位面积所吸收的大气长波辐射;M_g 为地面的自身辐射;H 为显热交换;LE 为潜热交换,与大气的相对湿度以及地表含湿量有关,G 为地面向下的导热量。这些热能交换项的计算,需要输入时间、地点、气象和地表物性等参数,详见参考文献[5-6]。

根据导热数学模型,地表热能向下的传递过程主要与地表本身的材质物性参数有关;而地表与环境间的热能交换,除了与气象条件有关,还会受到地形因素的影响。通过计算地面坡度、坡向、天空可视因子和太阳入射阴影系数等,可得到起伏地面的入射辐射(太阳直射、天空散射、领域辐射);据此建立地面的热平衡条件,即上边界条件,利用一维导热数学模型,计算得到三维地表的热辐射,如图 4 所示。

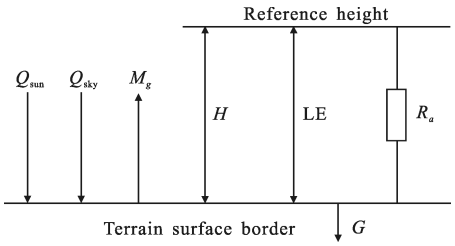


图 4 地表能量交换示意图

Fig.4 Schematic diagram of energy exchange at earth's surface

2.2 太阳投影系数计算

真实地表存在地势起伏,而太阳光为平行光,地势较高的区域会对地势较低的区域产生遮挡。因此需要计算出各单元表面的太阳入射投影系数,即实际照到该表面上的太阳光的份额与不存在遮挡时照到该表面上的太阳光的总份额的比值,它介于 0 和 1 之间。若是单元表面区域面积很小,基本可以忽略部分遮挡的情况。因此,计算所得太阳投影系数仅取 0 或 1 两个值,即表示不遮挡或完全被遮挡。

利用光线追踪法,从单元表面中心反向跟踪太阳光束。通过判断之前生成的地形网格中,是否有三角形与该光束相交,来确定该点是否受到遮挡。其具体步骤如下:

(1) 坐标系建立

选取高程数据的大地坐标系为固定坐标系,即正东方向为 X 轴正方向,正南方向为 Y 轴正方向,垂直于 XY 平面向上的方向为Z 轴正方向,如图 5 所示。

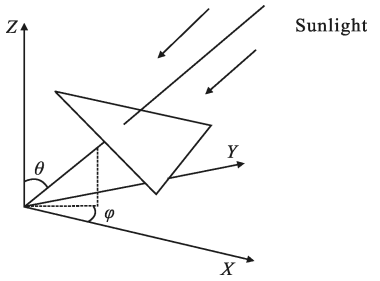


图 5 坐标系的选取及太阳入射方向与地表位置的关系

Fig.5 Coordinate selection and the relation between sunlight incident angle and terrain position

(2) 光束矢量计算

根据地理位置和日期时间,计算太阳入射方向,以太阳光方向矢量的反向$-\vec{s}$为发射方向。

(3) 光线与某面交点的确定

用参数方程写出光线方程如下:

$$\begin{cases} x=x_0+t\cdot\vec{m}_1 \\ y=y_0+t\cdot\vec{m}_2 \\ z=z_0+t\cdot\vec{m}_3 \end{cases} \tag{3}$$

式中:(x_0,y_0,z_0)为发射点的坐标;$(\vec{m}_1,\vec{m}_2,\vec{m}_3)$为光线发射方向$-\vec{s}$的三个分量。单位三角面的平面方程为:

$$n_x x+n_y y+n_z z+d=0 \tag{4}$$

式中：(n_x, n_y, n_z)为平面法线矢量$\vec{n}$的三个分量。

两个方程联立求解可以得到 t 和交点坐标(x, y, z)。

(4) 相交判定

判断由发射点发出的光线是否与其它面存在交点，以及交点是否在接收面三角形区域内。如都能满足，说明该单位表面被其它面遮挡；反之说明该单位表面完全受到太阳光照射。

2.3 地表入射辐射计算

如果忽略地表和大气之间的多次反射，邻近地表之间的多次反射，地表总入射辐射可分为 3 部分：太阳直接辐射、天空散射辐射和周围地形的一次反射形成的附加辐射，如图 6 所示。复杂地形下地表太阳入射总辐射能量可以表示为：

$$Q_{sun}=Q_{dir}+Q_{dif}+Q_{add} \tag{5}$$

式中：Q_{dir} 为地表太阳直接辐射；Q_{dif} 为天空散射辐射；Q_{add} 为邻近地形的附加辐射。

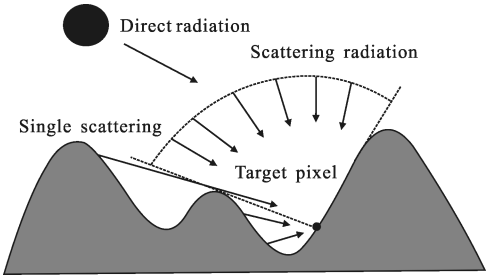


图 6 起伏地面接收太阳辐射示意图

Fig.6 Schematic diagram of solar radiation accepted by fluctuant earth′s surface

对于起伏地形，地表太阳直接辐射跟太阳光线与地面所成夹角有关，和表面与太阳入射投影系数有关，即

$$Q_{sund}=\xi E_0 P^m D\cos i \tag{6}$$

式中：E_0 为太阳常数，W/m^2；h 为太阳高度角；P 为大气透明度；D 为太阳入射投影系数；i 为太阳光入射角，它与地面的坡度和坡向有关，可根据由数字高程建立的三维地形计算得出。

天空散射辐射的计算不仅要考虑倾斜面的倾角，它还与天空可视因子有关：

$$Q_{suns}=\frac{1}{2}E_0\sin h\frac{1-P}{1-1.4\ln P}\cos^2\frac{\beta}{2}\cdot V_d \tag{7}$$

式中：β 为倾斜面与水平面间的夹角，同样可由三维地形求出；V_d 为天空可视因子，它定义为：在地面上往天空看无阻碍地看到天空占半球空间的份额。具体计算方法可参考文献[7-8]。

邻近地域的附加辐射为周围邻近的地表面反射太阳光到目标表面的部分，计算表达式如下：

$$Q_{add}=\frac{1}{2}(1-\cos\beta)\cdot\varepsilon_{mean}\cdot(Q_{dir}+Q_{dif}) \tag{8}$$

式中：ε_{mean} 为周围邻近地表的平均反射率；β 为地面坡度。

3 地面热辐射场模拟及热像生成

上述内容通过分析三维地表的热辐射产生和传递机制，建立了热红外辐射模型。在此基础上，利用高分辨率光学影像和与之匹配的高程数据，生成与光学影像分辨率一致的地面热红外图像。

3.1 地面热辐射场模拟

实拍的地面光学影像真实反映了地貌特征和空间分布，据此提取地表材质信息，确定每个像素对应的地物类型；根据高程数据建立的地形网格，获得每个像素对应的地形因素(坡向、坡度、投影系数、天空可视因子)。利用前述的地表热辐射模型，逐像元计算地表辐射，实现地表热辐射场的模拟。具体方法如图 7 所示。

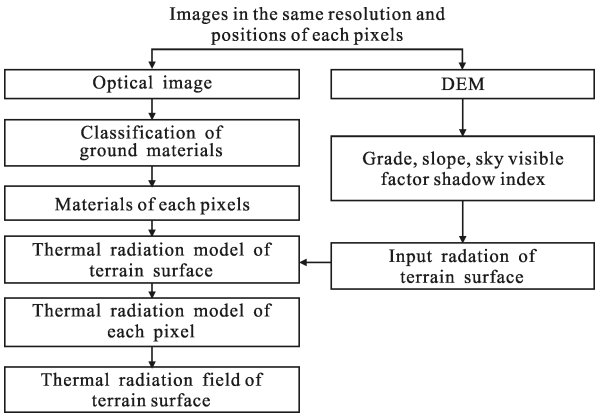
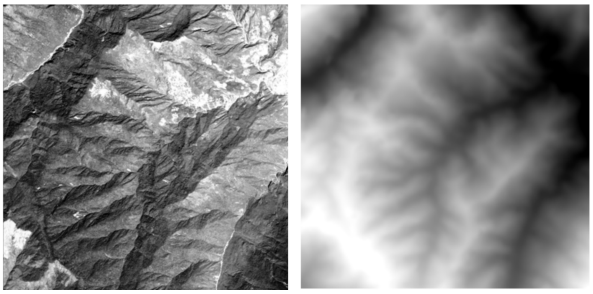


图 7 地面热辐射场模拟流程

Fig.7 Simulation flow chart of thermal radiation field on the earth′s surface

图 8(a)所示的是 IKONOS 拍摄于四川某处山区的高分辨光学遥感影像，地面分辨率 4 m，中心经纬度(103.26°E，31.06°N)；图 8(b)是与之匹配的 DEM 高程数据。以此为输入源，模拟该地区在 2012 年 10 月 1 日不同时刻的地面热辐射场分布。



(a) 高分辨率光学影像　　(b) 影像匹配高程数据图

(a) High resolution optical image　(b) Elevation data of the image

图 8 地面光学图像与高程数据

Fig.8 Optical image of earth′s surface and its elevation data

图 9 显示了地表热辐射场在一天中不同时刻的分布情况。为了直观体现地表的热能,图中右侧标尺显示了不同灰度对应的地表温度值。可以看到,地表阴影分布直接决定了地表接收的太阳辐射能量,直接照射的区域和未被照射的区域亮度有明显的反差;而在局部区域,亮度有一定起伏,那是因为,每个像素点对应的坡度和坡向不同, 导致太阳入射角有所差别,造成了差异。在地势起伏剧烈的地方,差异明显。

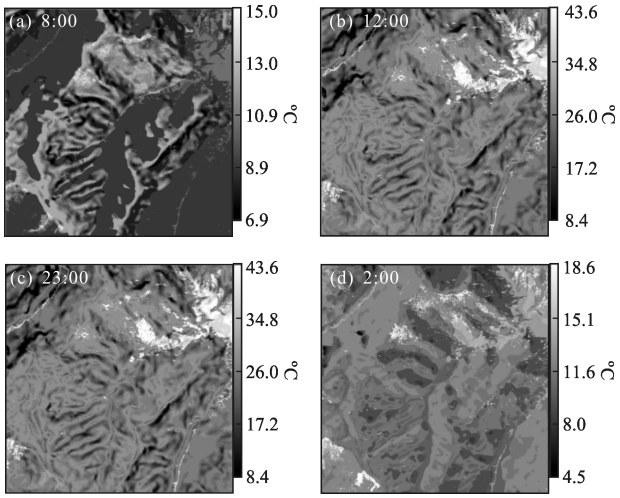


图 9 不同时刻的地面热辐射分布图

Fig.9 Thermal radiation distribution of earth′s surface at different time

3.2 热红外图像生成

光学纹理与红外纹理表现的都是电磁能量的二维分布,存在一定的相关性[9]。基于图 8(a)的光学图像, 提取可见光纹理的掩膜数据, 与地面热辐射图(图 9)叠加,生成地物的红外纹理。将地面热红外纹理图像通过纹理映射覆盖到三维地形几何模型 (如图 1 所示)上,得到三维地面热红外影像如图 10 所示。

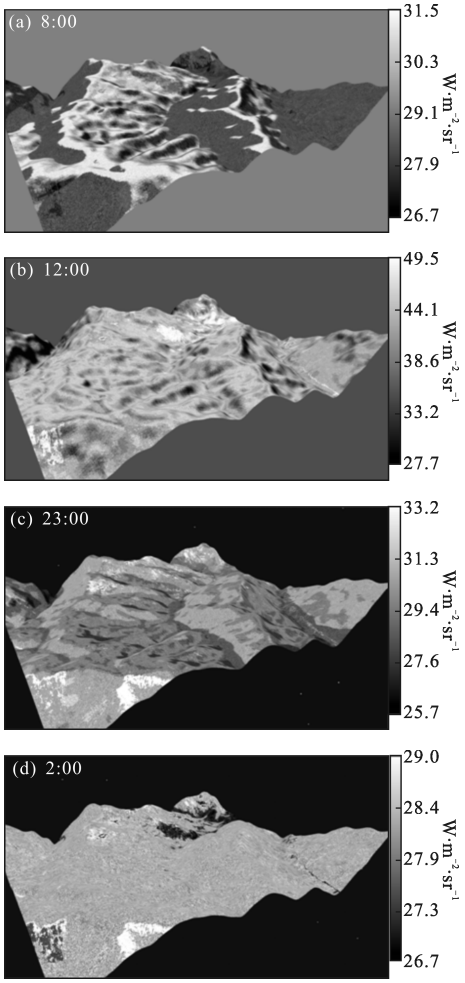


图 10 不同时刻的地面热红外场景

Fig.10 Thermal picture of earth′s surface at different time

图 10 中以左下角为起点, 从左到右为向东方向,从下到上为向北方向。可以看出:在白天,随着时间推移,地表阴影分布不断变化,向阳面总是比被阳面的热辐射高; 中午时刻由于该区域都处于太阳的照射下,地表热辐射分布较均匀。但是,由于坡度和坡向的影响,热辐射存在起伏差异;夜间,地表热辐射开始降低, 且辐射分布由于不受地形和光照因素的影响,开始趋于一致。但是由于热能的持续作用,白天留下的阴影区域仍然可现。到了凌晨,同材质地表各处热辐射基本接近一致。裸露地表亮度凸显,因为土壤和沙层在这一时段温度比周围植被高。从以上分析可知,模拟的地表热辐射场,不论从空间分布还是从时间变化上来说,都是正确合理的,与实际情况十分吻合。

4 结束语

真实地表地势起伏多变，限制了基于平坦地表假设的地表热辐射模型的适用性。针对这一问题，文中提出了复杂地形地表的热辐射场模拟方法。该方法结合地形因素，根据地表材质分布情况，逐像素计算地面温度，得到了地表的热红外辐射场。在此基础上，结合实拍光学影像和高程数据，生成了山区地形一天中不同时刻的地面热红外图像(分辨率为 4 m)，其结果真实反映了地表热辐射的空间分布和时间变化。这为解决实际应用中对热红外影像数据的需求问题提供了一种有效的途径。

参考文献：

[1] Wang Yue, Lu Qiushi, Ye Qing qing. Infrared characteristic model of ground background [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2010, 39(6): 889-992. (in Chinese)
王玥, 卢秋实, 叶青青. 地面背景的红外特性模型[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 889-992.

[2] Bai Changcheng, Zhang Jianqi, Zhang Haixing, et al. A comparative general model of infrared radiation from soil[J]. ***Journal of Xidian University***, 1993, 20(3): 74-78. (in Chinese)
白长城, 张建奇, 张海兴, 等. 一种较普遍的地表红外辐射模型[J]. 西安电子科技大学学报, 1993, 20(3): 74-78.

[3] Wang Yinghua, Shen Guotu, Yang Baocheng, et al. Improvement on the model of IR radiation field of natural terrain[J]. ***Journal of East China Normal University(Natural Science)***, 2006, 5: 121-126. (in Chinese)
王英华, 沈国土, 杨宝成, 等. 自然地表红外辐射场模型的改进[J]. 华东师范大学学报(自然科学版)), 2006, 5: 121-126.

[4] Corripio J G. Vectorial algebra algorithms for calculating terrain parameters from DEMs and the position of the sun for solar radiation modelling in mountainous terrain [J]. ***International Journal of Geographical Information Science***, 2003: 17-23.

[5] Shao Xiaopeng, Zhang Jianqi. The study on infrared texture simulation based on GLC model [J]. ***J Infrared Millim Waves***, 2003, 22(5): 341-345. (in Chinese)
邵晓鹏, 张建奇. 基于 GLC 模型的红外纹理合成方法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(5): 341-345.

[6] Han Yuge, Xuan Yimin, Tang Ruifeng. Random generation of natural terrain and its IR feature simulation[J]. ***J Infrared Millim Waves***, 2000, 19(2): 129-133. (in Chinese)
韩玉阁, 宣益民, 汤瑞峰. 天然地形的随机生成及其红外辐射特性研究[J]. 红外与毫米波学报, 2000, 19(2): 129-133.

[7] Kondratyev K Y. Radiation regime on inclined surfaces[C]// World Meteorological Organization, Note Technique,1997, 152: N11613.

[8] Temps R C, Coulson K L. Solar radiation incident upon slopes of different orientations [J]. ***Solar Energy***, 1977, 19: 179-184.

[9] Chen Shan, Sun Jiyin, Guo Wenpu, et al. A new infrared texture generation method [J]. ***Journal of Dalian Maritime University***, 2010, 36(4): 103-106. (in Chinese)
陈珊，孙继银，郭文普，等. 一种新的红外纹理生成方法[J]. 大连海事大学学报, 2010, 36(4): 103-106.