

基于遥感数据的地球背景中红外场景仿真

李霞^{1,2,3}, 刘建国^{1,2}, 董雁冰³, 刘兴润³

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院环境光学与技术重点实验室,
安徽 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;
3. 光学辐射重点实验室, 北京 100854)

摘要: 卫星遥感是研究地球大气背景红外辐射特性的重要手段, 受大气影响及传感器观测条件的限制, 无法获取多气象、多探测条件的辐射数据。针对该问题, 基于 JHU 地物光谱数据库, 分析了植被、水体、岩石等光谱辐射特性, 结合传感器光谱响应, 建立了 3~5 μm 基于光谱相关性的地表辐射波段转换模型, 并利用逐步回归法计算误差, 模型误差小于 10%。利用 MODIS、AIRS 等多源遥感数据产品, 根据地表-大气-传感器辐射传输模型, 模拟不同时空分辨率、探测条件等的地球背景辐射中红外图像。结果表明, 利用多源遥感数据进行中红外图像仿真, 可以实现大尺度、具有细致纹理结构的图像模拟, 应用于遥感研究。

关键词: 红外辐射; 图像仿真; 波段转换; 大气传输

中图分类号: TN211 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1104004

Simulation of global mid-infrared background based on remote sensing data

Li Xia^{1,2,3}, Liu Jianguo^{1,2}, Dong Yanbing³, Liu Xingrun³

- (1. Key Lab of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
3. Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing 100854, China)

Abstract: Satellite remote sensing is an important means to study the infrared radiation characteristics of the earth's atmosphere background. Due to the influence of atmosphere and the limitation of sensor observation conditions, it is impossible to obtain multi-meteorological and multi-detection radiation data. Aiming at this problem, the spectral radiation characteristics of vegetation, water and rock were analyzed based on JHU spectral database. Based on the spectral response of sensors, a model of surface radiation band transformation model based on spectral correlation was established for 3–5 μm . The error was calculated by the stepwise regression method, and the model error was less than 10%. Using MODIS, AIRS and other multi-source remote sensing products, and according to the surface-atmosphere-sensor radiation transfer model, the mid-infrared image of the earth background radiation was simulated. It can simulate the mid-infrared image of the earth background radiation with different temporal and spatial

收稿日期: 2018-06-10; 修订日期: 2018-07-20

作者简介: 李霞(1978-), 女, 研究员, 博士生, 主要从事光学建模等方面的研究。Email: lixia207@sina.com

导师简介: 刘建国(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事环境污染光学监测技术等方面的研究。Email: jgliu@aiofm.ac.cn

resolution and detection conditions. The results show that the simulation of mid-infrared image with multi-source remote sensing data can achieve large-scale and fine texture image simulation which can be used in remote sensing research.

Key words: infrared radiation; image simulation; band extrapolation; atmospheric transmission

0 引言

遥感具有全球观测的能力,可以获得多空间分辨率、多光谱分辨率的地球观测图像,便于地球科学的研究工作。为满足不同研究的需要,通常希望能够获取反映多种自然条件下不同空间、光谱和时间分辨率的遥感图像。然而受大气影响及传感器观测条件的限制,无法获取足够的遥感图像以满足科学研究的需要,针对此问题提出的图像模拟技术得到了快速的发展^[1-2]。利用计算机进行遥感成像系统的仿真有助于遥感系统的整体设计,也是评价遥感系统性能、载荷的有力工具,同时,良好的仿真模拟系统也会弥补遥感系统在时间分辨率、空间分辨率、光谱分辨率等方面的不足^[3-4]。例如,Verheef 对高光谱图像和多角度热红外图像进行了仿真模拟,其突出特点是不依赖高分辨率图像,从植被生理生化参数和气象条件入手,以冠层辐射传输模型为基础,模拟出热红外遥感图像^[5]。Jerrell R. Ballard 等人根据自然背景的三维空间结构,利用表面能量平衡模型对构成场景的基本植被和土壤进行了计算,并给出了不同分辨率和传感器观测到的红外场景。张伟清、韩玉阁等根据地表类型,建立地球表面区域温度模型和红外辐射亮度模型,然后运用数值计算方法得到地球表面温度和红外辐射亮度分布^[6]。王章野等人建立了桥梁、建筑物、铁路等目标模型成像模型。张建奇等人进行了各种自然地面背景的红外辐射理论和实验研究。以上研究采用物理模型的模拟方法,对遥感图像的细节模拟不够细致,此外,卫星遥感的红外图像是地表辐射与大气辐射传输的综合作用结果,其中,地表辐射受地物类型及辐射特性影响并随时间、空间变化存在较大变化,大气效应包括大气自身热辐射以及对地表辐射的散射与吸收,大气辐射随水汽、二氧化碳、臭氧、气溶胶等成分变化以及温度、湿度等大气廓线变化显著。由于地表与大气辐射受众多因素影响,使得地

球背景红外辐射具有很强的时间、空间变化性,利用观测设备进行多条件试验测量是获取背景辐射数据的直接且有效的途径,但该方法耗时长、成本高。针对这一问题,文中对 JHU 地物光谱数据库中的多种地物反射率、发射率数据进行统计分析,建立了基于地表辐射光谱相关性的波段转换模型,并对该模型的精度进行了计算,以 MODIS、AIRS 等遥感产品为数据源,根据地表-大气-传感器空间几何位置关系,仿真生成不同观测条件、时空分辨率的大尺度复杂地球背景 3~5 μm 红外图像。

1 建模方法

星载传感器遥感成像过程中,测量的红外图像是地表、大气与传感器相互作用的结果,具体过程为地表辐射经过大气衰减,并与大气自身辐射、散射相叠加,最终到达传感器口面,再经过传感器的光学系统、光电转换等输出红外图像,因此地球背景红外辐射场景仿真的关键是地表-大气-传感器红外辐射传输模型的构建以及地表辐射、反射特性的计算。

1.1 地表-大气-传感器辐射传输模型

设地表为朗伯体,大气具有各向同性,传感器接收到的能量为:

$$L(\lambda)=L_0(\lambda)H(\lambda) \quad (1)$$

$$L_0(\lambda)=L_1(\lambda)+L_2(\lambda)+L_3(\lambda)+L_4(\lambda) \quad (2)$$

$$L_1(\lambda)=B_\lambda(\lambda,T)\cdot\rho(\lambda)\cdot\tau_1(\lambda) \quad (3)$$

$$L_2(\lambda)=\frac{E\cos\theta}{\pi}\tau_1(\lambda)\cdot\tau_2(\lambda)\cdot\rho(\lambda) \quad (4)$$

式中: $L(\lambda)$ 为传感器测量的辐射亮度,单位 $W/m^2\cdot sr^{-1}$; $L_0(\lambda)$ 为到达传感器口面前的总辐射亮度; $L_1(\lambda)$ 为地表辐射亮度; $L_2(\lambda)$ 为地表反射亮度; $L_3(\lambda)$ 为大气辐射亮度; $L_4(\lambda)$ 为大气散射亮度; $B_\lambda(T)$ 为黑体光谱辐射亮度, T 为地表温度,单位为 K ; $\rho(\lambda)$ 为地表发射率; $\tau_1(\lambda)$ 为传输路径的大气上行透过率; $\tau_2(\lambda)$ 为

传输路径的大气下行透过率; E 为太阳常数, 单位 W/m^2 ; θ 为天顶角; $H(\lambda)$ 为传感器光谱响应。

为了定量测量背景辐射, 通常对传感器进行辐射定标, 定标方程为:

$$DN=aL(\lambda)+b \quad (5)$$

式中: a 和 b 分别为定标系数。

由辐射传输方程可以看出, 计算传感器接收的能量需要确定地表温度、地表发射率和大气辐射、散射能量。

1.2 基于光谱相关性的波段转换模型

遥感数据邻近波段间的光谱维相关性被认为普遍存在, 并应用于多光谱和高光谱数据的无损压缩算法研究^[7], 考虑到地表辐射在光谱维的相关性, 利用波段转换的方式可获得仿真波段的地表反射率或发射率数据, 为后续的辐射传输计算提供输入数据。具体方法为根据仿真波段, 选择具有相近波段的卫星遥感测量数据作为数据源, 然后基于光谱库多种地物(岩石、水体、植被等)光谱数据, 进行波段辐射等效计算, 进而分析仿真波段与邻近波段的地表反射率或发射率间的相关性, 以获得基于邻近波段的地表反射率或发射率生成模型。最后将该模型延伸至图像级别, 利用邻近波段的图像数据, 实现对应仿真波段的地表反射或发射率图像模拟。图 1 为波段转换流程图。

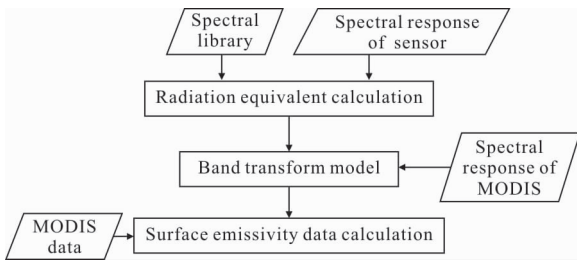


图 1 波段转换流程图

Fig.1 Flow chart of band transform model

1.2.1 卫星遥感数据及地物光谱数据选取

目前, 针对不同的应用发射的卫星测量了大量数据, 包括陆地、海洋、气象等各类数据, 对于卫星数据的应用实时业务上以 NOAA 卫星资料应用较多, 科研上以 NASA 卫星资料应用较多^[8], 在选取遥感数据产品时, 首先要根据仿真波段、分辨率等进行选

取, 即选取与仿真波段相近的数据, 此外为了使仿真图像具有细致的纹理细节, 要选取具有较高分辨率的数据, 但是目前的遥感数据产品具有高光谱分辨率, 低空间分辨率, 或者低光谱分辨率, 高空间分辨率的特点, 考虑光谱分辨率与空间分辨率的特点, 文中以 TERRA 与 AQUA 卫星上的中分辨率成像光谱仪 MODIS 测量的数据为数据源, MODIS 传感器有 36 个光谱通道, 波长范围为 $0.4\sim 14 \mu m$, 分辨率分别为 250、500、1 000 m, 同一测量地点的数据更新频率为每天 2~4 次。地表分类产品的发布频率为一年一期。用于场景仿真的数据主要为地表分类和反射率数据。为了仿真 $3\sim 5 \mu m$ 地球背景辐射, MODIS 遥感数据中已有的波段数据和需要补充计算的波段如表 1 所示。

表 1 波段参数表

Tab.1 Band parameter table

| MODIS band | | Calculation band | |
|--------------|---------------------------|------------------|---------------------------|
| Band number | Wavelength range/ μm | Band number | Wavelength range/ μm |
| MODIS_band20 | 3.660-3.840 | Simu_band1 | 3-3.660 |
| MODIS_band22 | 3.929-3.989 | Simu_band2 | 3.840-3.929 |
| MODIS_band23 | 4.020-4.080 | Simu_band3 | 3.989-4.020 |
| | | Simu_band4 | 4.080-5 |

地物光谱数据选取美国约翰·霍普金斯大学与美国地质调查局联合开发的 JHU (John Hopkins University) 数据库^[9], 包含 15 个子数据库, 分别是粗/细岩浆岩、人造物、土壤、矿物等。其中矿物和陨石样品的光谱数据是双向反射率, 波段为 $2.08\sim 25 \mu m$, 地物类型测量的是半球-方向反射率数据。文中将数据库中具有光谱差异性的不同地物种类的光谱数据进行插值, 将光谱间隔统一为 1 nm, 建立子光谱库, 包括 48 种地物类型, 其中, 人造地物 13 种, 水体 5 种, 土壤 12 种, 雪 4 种, 岩石 10 种, 植被 4 种。

1.2.2 波段辐射等效计算

MODIS 发布的为反射率数据产品, 根据基尔霍夫定律, 得到发射率数据为:

$$\rho(\lambda)=1-\varepsilon(\lambda) \quad (6)$$

式中： $\varepsilon(\lambda)$ 为地表光谱反射率。

计算得到的反射率数据叠加了 MODIS 传感器的光谱响应，因此需根据土地分类产品在光谱数据库中选取具有相同地表类型的光谱进行波段辐射等效计算，计算结果用于 1.2.3 节的光谱相关性计算。计算公式如下：

$$\rho=\frac{\sum \rho_{JHU}(\lambda) f_{MODIS}(\lambda)}{\sum f_{mMODIS}(\lambda)} \quad (7)$$

式中： $\rho_{JHU}(\lambda)$ 为地物光谱子数据库中的地表光谱发射率； $f_{MODIS}(\lambda)$ 为 MODIS 传感器光谱响应函数。图 2 为 MODIS 传感器的光谱响应曲线。

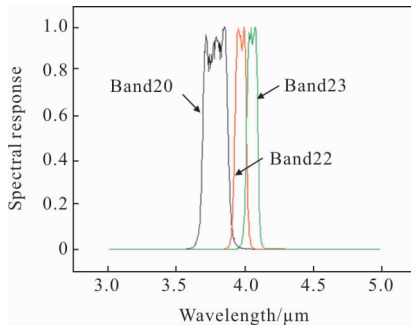


图 2 MODIS 光谱响应函数

Fig.2 Spectral response of MODIS

1.2.3 数据源波段与仿真波段相关性分析

由表 1 可知，MODIS 在 3~5 μm 有 MODIS_band20、MODIS_band22 和 MODIS_band23 共 3 个波段的测量数据，为了确定使用哪个波段的数据进行波段转换计算，需要进行相关性分析，线性相关系数计算公式为：

$$r=\frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \quad (8)$$

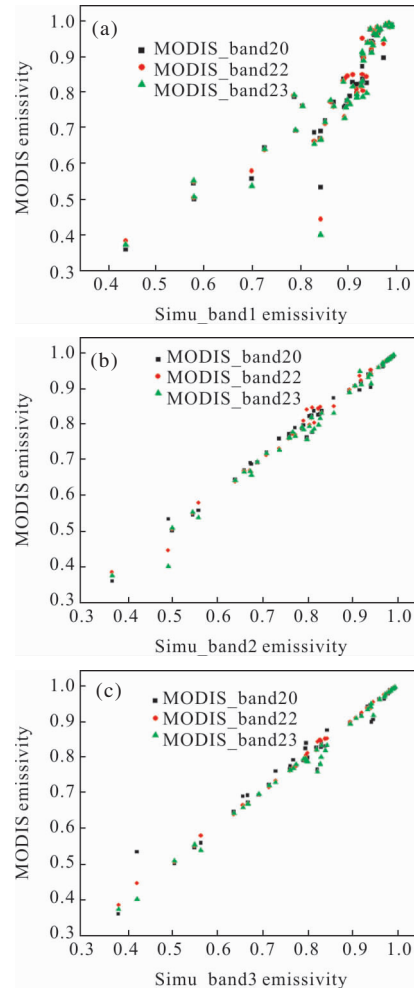
式中： r 为相关系数，表示两个变量间线性相关强弱的程度， r 的取值在-1 与+1 之间，若 $r>0$ ，表明两个变量是正相关，即一个变量的值越大，另一个变量的值也会越大；若 $r<0$ ，表明两个变量是负相关，即一个变量的值越大另一个变量的值反而会越小。 r 的绝对值越大表明相关性越强。将已知波段的发射率、平均发射率，待计算波段的发射率、平均发射率分别代入 x 、 \bar{x} 、 y 和 \bar{y} ，即可得到 r ，计算结果见表 2。

表 2 相关性分析结果

Tab.2 Correlation analysis results

| Band number | MODIS_band20 | MODIS_band22 | MODIS_band23 | Simu_band1 | Simu_band2 | Simu_band3 | Simu_band4 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|------------|------------|------------|
| MODIS_band20 | 1 | 0.98 | 0.98 | 0.90 | 0.99 | 0.98 | 0.92 |
| MODIS_band22 | 0.98 | 1 | 0.993 | 0.87 | 0.99 | 0.99 | 0.94 |
| MODIS_band23 | 0.98 | 0.99 | 1 | 0.86 | 0.99 | 0.99 | 0.96 |
| Simu_band1 | 0.90 | 0.87 | 0.86 | 1 | 0.89 | 0.87 | 0.76 |
| Simu_band2 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.89 | 1 | 0.99 | 0.93 |
| Simu_band3 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.87 | 0.99 | 1 | 0.95 |
| Simu_band4 | 0.923 | 0.942 | 0.961 | 0.76 | 0.93 | 0.95 | 1 |

图 3 为数据源波段的发射率与仿真波段发射率散点分布图。



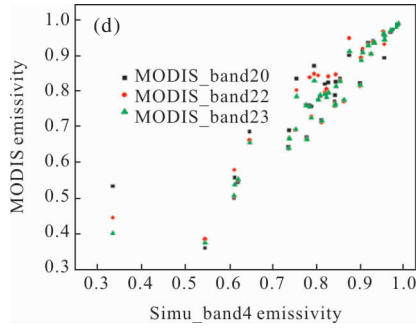


图 3 波段相关性散点图

Fig.3 Scatter plot of band correlation analysis

由以上结果可知;Simu_band1 与 MODIS_band20、MODIS_band22、MODIS_band23 的相关系数分别为 0.909、0.878、0.860,其中与 band20 相关程度较高。Simu_band2 与 MODIS_band20、MODIS_band22、MODIS_band23 的相关系数分别为 0.996、0.997、0.994,相关程度都较高。Simu_band3 与 MODIS_band20、MODIS_band22、MODIS_band23 的相关系数分别为 0.988、0.999、0.996,相关程度较高。Simu_band4 与 MODIS_band20、MODIS_band22、MODIS_band23 的相关系数分别为 0.923、0.942、0.961,相关程度较高。因此,可以用MODIS_band20、MODIS_band22、MODIS_band23 来共同模拟 Simu_band1、Simu_band2、Simu_band3、Simu_band4。

1.2.4 波段转换模型

从表 2 和图 3 的分析结果可以看出,MODIS 波段与仿真波段线性相关,因此利用线性回归方法构建波段转换模型,计算公式为:

$$y = ax_1 + bx_2 + cx_3 + d \tag{9}$$

式中:y 为待计算波段的反射率, x_1 、 x_2 、 x_3 分别为 MODIS_band20、MODIS_band22、MODIS_band23 的反射率,a、b、c、d 为拟合系数。

利用逐步回归法检验回归效果,计算公式为:

$$R^2 = \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \tag{10}$$

$$SS_{res} = \sum (\hat{\rho} - \rho)^2 \tag{11}$$

$$SS_{tot} = \sum (\rho - \bar{\rho})^2 \tag{12}$$

式中: SS_{res} 为回归平方和; SS_{tot} 为离均差平方和; $\hat{\rho}$ 为发射率估值; $\bar{\rho}$ 为发射率均值; R^2 越接近 1,回归的效果

越好。表 3 为拟合结果。

表 3 波段转换方程表

Tab.3 Band conversion equation

| Band number | | R^2 |
|-------------|---|-------|
| Simu_band1 | $Y = 1.909X_{MODIS_band20} + 0.604X_{MODIS_band22} - 1.761X_{MODIS_band23} + 25.367$ | 0.908 |
| Simu_band2 | $Y = 0.487X_{MODIS_band20} + 0.522X_{MODIS_band22} - 0.934$ | 0.999 |
| Simu_band3 | $Y = -0.071X_{MODIS_band20} + 0.746X_{MODIS_band22} + 0.324X_{MODIS_band23} + 0.058$ | 1 |
| Simu_band4 | $Y = -1.189X_{MODIS_band20} + 1.945X_{MODIS_band22} + 23.760$ | 0.961 |

1.2.5 误差分析

选取子光谱库之外的 20 种地物光谱数据对波段转换模型进行验证,其中包括人造地物 6 种、水体 2 种、土壤 4 种、雪 1 种、岩石 5 种、草 2 种,结果如表 4 所示。

表 4 误差分析结果表

Tab.4 Error analysis result

| Band number | Average error | Maximum error |
|-------------|---------------|---------------|
| Simu_band1 | 3.06% | 9.60% |
| Simu_band2 | 0.28% | 1.72% |
| Simu_band3 | 0.10% | 0.33% |
| Simu_band4 | 1.42% | 4.76% |

由表 4 分析可知,所有波段平均误差在 5% 以下,最大误差为 9.6%,转换模型方程式误差小,模拟效果较好。

1.3 大气辐射、散射计算

传输路径上的大气辐射与散射可由中等分辨率大气辐射传输软件 MODTRAN 计算得到,MODTRAN 可计算从 0.2 到 100 μm 的大气光谱透过率及程辐射,光谱分辨率为 1 cm^{-1} ,它将地球大气分成中纬度夏季模式、中纬度冬季模式、热带模式、极地夏季模式、极地冬季模式等统计模式^[10],为了提高仿真结果精度,文中以大气红外探测器 AIRS 测量的地表到 40 km 高空的温、湿度廓线作为 MODTRAN 计算的输入数据,例如图 4 为 2016 年 6 月 3 日,经度 108°,纬度 49°的大气廓线图。

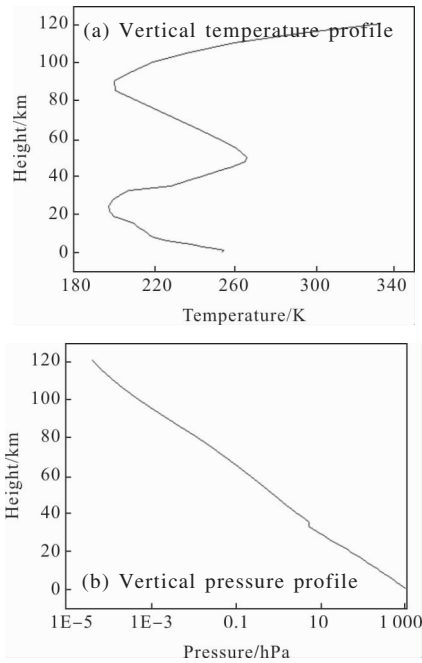


图 4 大气廓线

Fig.4 Atmospheric profile

2 仿真结果

以 2016 年 6 月 3 日 MODIS 测量的祁连山脉地区(经度 108.49°, 纬度 49.27°)的地表分类数据和发射率数据, 根据表 3 的转换方程进行 3~5 μm 图像模拟, 大气模式为中纬度夏季, 太阳天顶角为 26.9°, 定标方程为: $DN=265L+1980$, 传感器分辨率为 200×200, 光谱响应为方形波。图 5 为晴空无云的辐射亮度图, 辐射亮度最大值为 2.78 W/(m²·sr), 最小值为 0.71 W/(m²·sr), 均值为 1.59 W/(m²·sr), 图 6 为夜晚有云的辐射亮度图, 云类型为高空卷云, 云高为 8 km, 云厚为 0.5 km, 辐射亮度最大值为 1.22 W/(m²·sr), 最小值为 0.36 W/(m²·sr), 均值为 0.87 W/(m²·sr)。

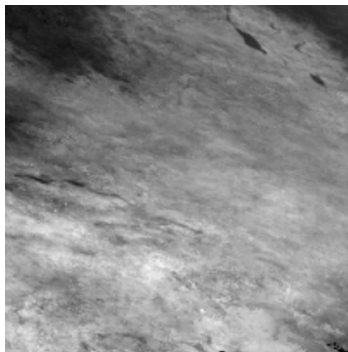


图 5 白天无云地球背景辐射

Fig.5 Radiance of earth background at cloudless daytime

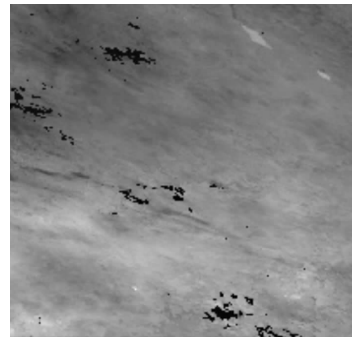


图 6 夜晚有云地球背景辐射

Fig.6 Radiance of earth background at cloudy night

以 2016 年 5 月 13 日 MODIS 测量的塔克拉玛干沙漠地区(经度 78.12°, 纬度 39.33°)的图像进行 3.62~3.64 μm 窄波段的辐射亮度图像模拟, 大气模式为中纬度夏季, 太阳天顶角为 35.6°, 发射率转换方程如下:

$$Y=1.474X_{MODIS_band20}-0.166X_{MODIS_band22}-0.33X_{MODIS_band23}+2.332 \quad (13)$$

图 7 为经过线性拉伸白天有云的辐射亮度图, 辐射亮度最大值为 0.009 5 W/(m²·sr), 最小值为 0.001 W/(m²·sr), 均值为 0.007 6 W/(m²·sr)。图 8 为经

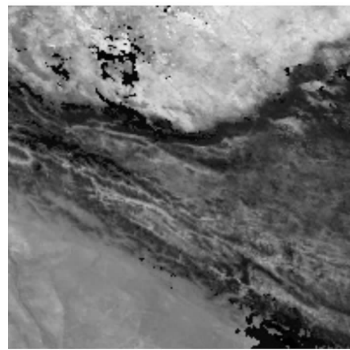


图 7 白天有云地球背景辐射

Fig.7 Radiance of earth background at cloudy daytime

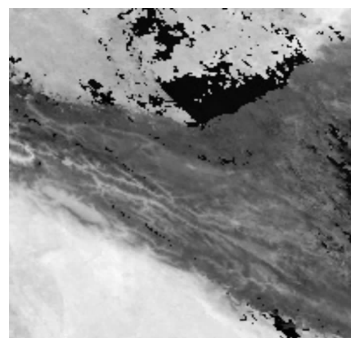


图 8 夜晚无云地球背景辐射

Fig.8 Radiance of earth background at cloudless night

过线性拉伸夜晚无云辐射亮度图, 辐射亮度最大值为 $0.0072 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, 最小值为 $0.001 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, 均值为 $0.0023 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。

3 结 论

利用 MODIS 发布的地表分类和发射率数据产品, 基于 JHU 光谱数据库数据, 分析不同地表类型(植被、水体、岩石等)的 MODIS 测量波段与 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 波段光谱发射率相关性规律, 构建波段转换模型, 利用逐步回归法计算误差, 结果表明该模型精度高, 误差小, 最大误差小于 10%。在此基础上, 根据地表-大气-传感器空间位置关系, 建立辐射传输方程, 利用多源卫星遥感数据(气象数据产品)叠加大气辐射传输影响, 最终生成地球背景中红外图像, 可以实现大尺度、具有细致纹理结构的图像模拟, 用于不同光谱分辨率、不同时间、探测条件和气象条件等的背景辐射研究。该方法的关键是有较高光谱分辨率和一定时间分辨率的遥感数据, 并且数据源波段与被仿真波段具有较高的相关性, 后续将对其他红外波段图像仿真开展研究。

参考文献:

- [1] Chen Fang, Niu Zheng. Simulation of an image with a subsection of spectral band using an image with a wider spectral band [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(5): 89-90. (in Chinese)
- [2] Wang Lu. Study on infrared simulation based on OpenFlight model [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014. (in Chinese)
- [3] Yang Guijun, Liu Qinhuo, Huang Huaguo. Methods for simulating infrared remote sensing images based on scene models[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2007, 26(1): 15. (in Chinese)
- [4] Zhang Aiwu, Du Nan, Kang Xiaoyan, et al. Hyperspectral adaptive band selection method through nonlinear transform and information adjacency correlation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0538001. (in Chinese)
- [5] Verhoef W, Bach H. Simulation of hyper spectral and direction radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87: 23-41.
- [6] Zhang Weiqing, Xuan Yimin, Han Yuge. Approach of generating infrared picture about the earth background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 40-41. (in Chinese)
- [7] Zhao Huijie, Li Mingkang, Li Na, et al. A band selection method based on improved subspace partition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3155-3160. (in Chinese)
- [8] Zang Haijia, Wang Wenyan, Li Zhanqing. The United States Earth Observation System of Satellite Data Products and Services [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011. (in Chinese)
- [9] Korb A R, Dybwad P, Wadsworth W, et al. Portable FTIR spectrometer for field measurements of radiance and emissivity [J]. *Applied Optics*, 1996, 35: 1679-1692.
- [10] Rao Ruizhong. Modern Atmospheric Optical [M]. Beijing: Science Press, 2015: 115-116. (in Chinese)