

基于遥感反演的空间下视系统红外场景仿真

薛 莲, 张 力, 刘佳琪, 李志峰, 张陆萍

(试验物理与计算数学国家级重点实验室, 北京 100076)

摘 要: 空间红外下视系统的真实感红外场景仿真一直以来都是研究的一个难点。提出了一种基于卫星红外遥感反演数据的空间下视红外场景仿真方法。利用红外遥感反演数据, 通过匹配算法获得仿真波段内地表红外纹理, 建立了下视红外观测模型, 对地表红外纹理图像在传感器焦平面上重采样, 最后按照辐射传输理论, 计算生成光学入瞳前红外场景。仿真结果表明: 该方法可以逼真地模拟地物场景红外纹理特征。将热红外遥感反演技术应用于红外场景仿真, 极大简化了大规模地表场景仿真过程, 为空间下视系统红外场景仿真提供了一种直观、有效的新方法。

关键词: 红外场景仿真; 红外遥感反演; 红外成像模型; 红外纹理

中图分类号: TN214 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0704004

Infrared scene simulation of space down-looking system based on remote sensing inversion

Xue Lian, Zhang Li, Liu jiaqi, Li Zhifeng, Zhang Luping

(National Key Laboratory of Science and Technology on Test Physics & Numerical Mathematics, Beijing 100076, China)

Abstract: The simulation of realistic infrared scene in space infrared down-looking system has always been a difficult problem in the research. A new kind of infrared scene simulation method of space down-looking system based on remote sensing inversion was presented in this paper. Firstly, infrared texture of the terrain was extracted from the data of infrared remote sensing inversion by using matching algorithm. Secondly, an infrared detecting model of down-looking system was proposed, which simulated resampling of infrared texture on FPA. Finally, by using radiation and transmission theory, scene radiance image in front of the entrance pupil was calculated. The simulation results show that the proposed method can realistically simulate infrared texture feature of earth surface. In this paper, thermal infrared remote sensing technology is applied to infrared scene simulation, which greatly simplifies the simulation process of large scale terrain scene, and provides an intuitive and effective new method for infrared scene simulation of space down-looking system.

Key words: infrared scene simulation; infrared remote sensing inversion; infrared imaging model; infrared texture

收稿日期: 2015-11-15; 修订日期: 2015-12-20

作者简介: 薛莲(1980-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事红外系统测试技术方面的研究。Email: casc_xuelian@163.com

0 引言

红外场景仿真技术近年来快速发展。一些学者采用直接理论建模、求解热平衡方程的方法计算自然地表、海面红外特性^[1-2],也有一些学者利用美国 Paradigm 公司 multigen creator 模块生成三维地形,再基于 Vega 平台实现场景生成^[3-4],还有一些学者利用高分辨率可见光卫星影像实现几何构形,通过实测或求解热平衡方程的方法计算地表红外特性^[5-6],均取得不错效果。

空间红外下视系统工作在大气层外空间,工作时视向地球表面,视场内红外场景包含地表及大气,随视角变化场景不断变化,图像覆盖区域跨度大,分辨率为百米以上中/低尺度。文中针对空间下视系统红外场景特点,提出一种基于卫星红外遥感反演数据的下视红外场景仿真方法。利用较高分辨率红外遥感反演数据,通过匹配算法获得仿真波段内地表红外纹理,然后建立下视红外成像模型,对地表红外纹理图像在传感器焦平面上重采样,最后根据仿真当天气象条件,按照辐射传输理论,计算生成下视系统光学入瞳前红外场景。文中提出的方法相较以往方法,可以极大缓解建模、计算压力,提高仿真效率,又能更为逼真的模拟下视地物场景红外纹理特征。

1 地表红外纹理获取

地表红外纹理反映地球表面一个区域内地物红外辐射空间分布,主要由地物表面温度、波段内发射率表征。红外遥感反演获得地表温度是全球遥感定量研究的重要内容,目前温度反演精度可以达到 1 K^[7]。文中利用红外遥感反演得到的地表温度数据、遥感波段内地物发射率数据,通过地物匹配算法获得仿真波段内地表红外纹理信息。

选用美国 Terra 卫星 Aster 传感器热红外遥感反演数据。Aster 热红外子系统(TIR)包含 5 个通道,图像地面分辨率 90 m,波段范围详见表 1。Aster 遥感地面站对获得卫星影像进行反演处理,得到地表辐射亮度、波段发射率、地表温度,数据精度见表 2。

反演得到的地表温度数据可直接作为计算地表辐射的输入,发射率数据需要转换到仿真波段。将反演得到的 TIR 五个波段发射率数据与 USGS(U.S.

Geological Survey)地物波谱库进行匹配,辨识地物类型,再计算仿真波段内地表发射率。USGS 地物波谱库包括水、海水、公路、瓦片、雪、冰、砖、干草、土壤、咸土、植被等 25 种全球典型地物类型,红外光谱范围 3~14 μm,光谱分辨率 5 cm⁻¹。用 $i=1, 2, \dots, 25$ 对 USGS 库内地物类型进行编号, $j=1, 2, \dots, 5$ 表示 TIR 波段编号,判断地物类型:

$$i_{\text{optimat}}^* = \operatorname{argmin}_i \|E_i - E'\|^2 \quad (1)$$

$$\begin{cases} E' = [E_1', \dots, E_j']^T \in R^j \\ E_i = [E_1^{(i)}, \dots, E_j^{(i)}]^T \in R^j \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_j' 为 TIR 波段内像元对应的地表发射率; $E_j^{(i)} = \frac{1}{\Delta\lambda_j} \int_{\Delta\lambda_j} \varepsilon_i(\lambda) d\lambda$ 为地物在 TIR 波段内的发射率。

表 1 ASTER 热红外(TIR)子系统特性参数

Tab.1 Parameters of ASTER's TIR

System of ASTER	Band no.	Wavelength range/μm	Spatial resolution/m	Radiance accuracy
TIR	1	8.125-8.475	90	3K(200-240K) 2K(240-270K) 1K(270-340K) 2K(340-370K)
	2	8.475-8.825		
	3	8.925-9.275		
	4	10.25-10.95		
	5	10.95-11.65		

表 2 ASTER 热红外(TIR)遥感反演精度

Tab.2 Accuracy of remote sensing inversion of ASTER's TIR

	Radiance after atmospheric compensation (L_p)	Emissivity(ε)	Temperature of earth surface (T_k)
Absolute accuracy	2%	0.05-0.1	1-4 K
Relative accuracy	1%	0.005	0.3 K

根据地物类型 i_{optimat}^* , 计算仿真波段 $\Delta\lambda$ 内地表

发射率:

$$E_{\Delta\lambda} = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\Delta\lambda} \varepsilon_{i_{optimal}}^*(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

图 1 是遥感反演直接获得的某区域地表温度数据图像,图 2 是通过上述匹配方法计算得到的到 3~5 μm、8~12 μm 的发射率数据图像。

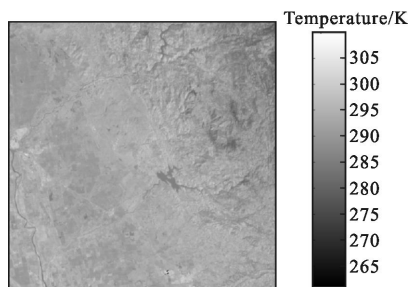


图 1 ASTER 遥感反演的地表温度图像

Fig.1 Retrieved temperature image of earth surface from ASTER data

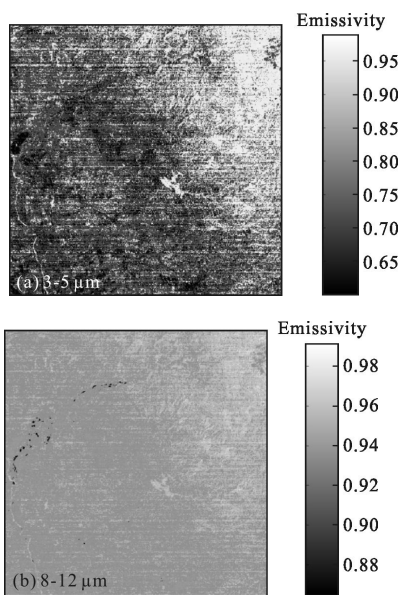


图 2 仿真生成的发射率图像

Fig.2 Simulated emissivity image of earth surface

2 空间下视系统红外观测模型

空间下视系统采用红外焦平面阵列(Focal Plane Array, FPA)传感器,地表辐射被系统接收成像的过程是地表辐射被离散化的过程^[8-9],在文中论述的方法中,可转化为空间下视系统在凝视方向上对地表红外温度图像、发射率图像在其传感器焦平面上的重采样过程。模型考虑相邻像元视线方向的遮挡,可适用大角度斜下视情况。计算流程如图 3 所示。

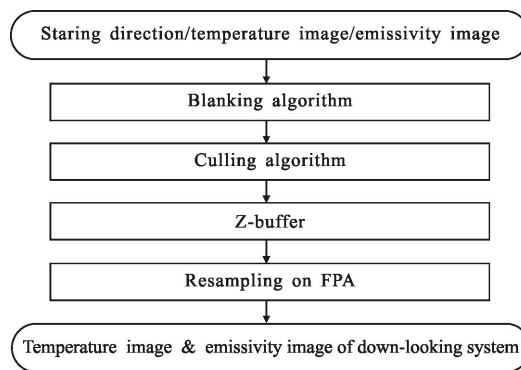


图 3 下视观测模型计算流程

Fig.3 Procedure of down-looking mode

2.1 消隐变换算法

根据卫星高程数据,在天基系统传感器坐标系中计算地面各像元的法线矢量,如果法线矢量与凝视方向夹角大于 90°,为可视面,小于 90°为遮挡面,将遮挡面剔除,如图 4 所示。

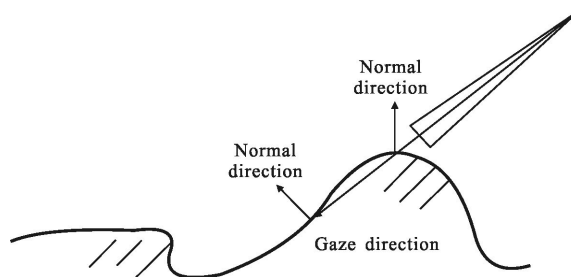


图 4 消隐变换示意图

Fig.4 Schematic of blanking algorithm

法线矢量计算模型如下所示。

对于由 $f(x,y)=z$ 确定的曲面法线,法线矢量可表达为:

$$n_x' = \frac{D(y, z)}{D(u, v)} \quad (4)$$

$$n_x = \begin{vmatrix} R_p \cos u \cos v \Delta u & R_p \cos v \Delta v_v \\ -R_p \sin u \sin v \Delta u & 0 \end{vmatrix} \quad (5)$$

$$n_y = \begin{vmatrix} 0 & -R_p \sin u \cos v \Delta u \\ R_p \cos v \Delta v_v & -R_p \cos u \sin v \Delta v_v \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$n_z = \begin{vmatrix} -R_p \sin u \cos v \Delta u & R_p \cos u \cos v \Delta u \\ -R_p \cos u \sin v \Delta u & -R_p \sin u \sin v \end{vmatrix} \quad (7)$$

式中: $R_p = R_e + DEM$, R_e 为地球平均半径; DEM 为高程数据; Δu 、 Δv 分别为经纬度相邻数据间隔。

将其转换到传感器坐标系中:

$$\begin{pmatrix} n_u \\ n_v \\ n_w \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中: R 是地心坐标系到传感器坐标系的转换矩阵。得到法线矢量后,对其与凝视方向作标积:

$$prjctA=(n_u, n_v, n_w) \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} \quad (9)$$

再做如下运算:

$$prjctA=\frac{1}{2} \frac{[prjctA-abs(prjctA)]}{prjctA} \quad (10)$$

$prjctA=1$ 对应可视面, $prjctA=0$ 对应隐藏面, 最后实现消隐变换。

2.2 裁剪变换算法

裁剪变换是在给定凝视方向、视场角大小后,对图像做裁剪,裁在四棱锥窗口内的像元取 1,反之取 0。

首先由凝视方向生成 4 个棱边矢量,并确定其在焦平面上的交点,4 个交点由 4 个边界量($Umin, Vmin, Umax, Vmax$)组合而成,如图 5 示意。

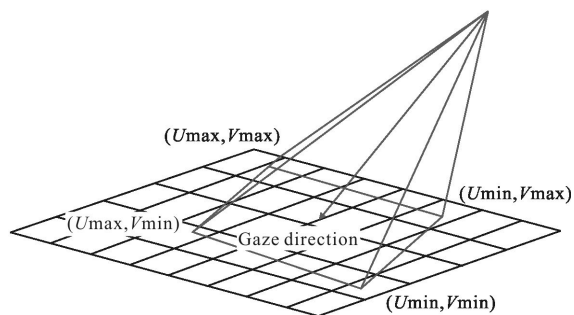


图 5 裁剪变换示意

Fig.5 Schematic of culling algorithm

再将所有地面坐标也缩放到焦平面上,判断这些地面点是否在 4 个交点范围内,若在该范围令系数为 1,反之为 0。

2.3 深度缓冲

经过消隐、裁剪变换后,将地面图像变为一个稀疏矩阵,然后对该稀疏矩阵进行深度缓冲排序。对焦平面的每一个像元对应的地面像元依照深度作一维排序,依照地面像元的深度,由远及近、依次对焦平面像元对应的温度和发射率分别采样,被遮挡的像元不采样,对已采样像元让其深度赋予 0 值,避免重复采样。最后对采样值作加权平均。

3 辐射亮度及大气传输计算模型

天基下视系统入瞳接收到的红外辐射主要包括

视线方向经大气作用的地表辐射 $L_g(\lambda, T)$ 和路径大气上行辐射 $L_{a\uparrow}(\lambda, T)$ 。计算公式如下:

$$L(T)=\int_{\Delta\lambda} (\tau_a(\lambda)L_g(\lambda, T)+L_{a\uparrow}(\lambda, T))d\lambda \quad (11)$$

将地表近似看做灰体,地表辐射 $L_g(\lambda, T)$ 可以表示为:

$$L_g(\lambda, T)=\varepsilon(\lambda)L_{bb}(\lambda, T)+(1-\varepsilon(\lambda)(L_{a\downarrow}(\lambda, T)+L_{as\downarrow}(\lambda, T))) \quad (12)$$

式中: $L_{bb}(\lambda, T)$ 为用普朗克公式计算的地表自发辐射; $L_{a\downarrow}(\lambda, T)$ 为路径大气下行辐射; $L_{as\downarrow}(\lambda, T)$ 为大气散射太阳辐射下行辐射; T 为地物表面温度; $\varepsilon(\lambda)$ 为地物光谱发射率; $\Delta\lambda$ 为仿真波段。

大气计算采用 MODTRAN 软件,输入仿真当天的气象参数或典型大气模式,设置天基系统位置、大气路径、太阳高低角、方位角等,并将地表温度作为大气边界条件,计算得到仿真波段内大气上行辐射 $L_{a\uparrow}(\lambda, T)$ 、下行辐射 $L_{a\downarrow}(\lambda, T)$ 、大气散射太阳下行辐射 $L_{as\downarrow}(\lambda, T)$ 。

4 仿真实例与分析

利用上述方法,以遥感反演数据为输入,并结合气象条件参数,按照上述流程仿真计算 Aster 某波段红外传感器光学入瞳前辐亮度图像,与 Aster 当天实际获得的遥感图像进行比较,如图 6、表 3 所示。

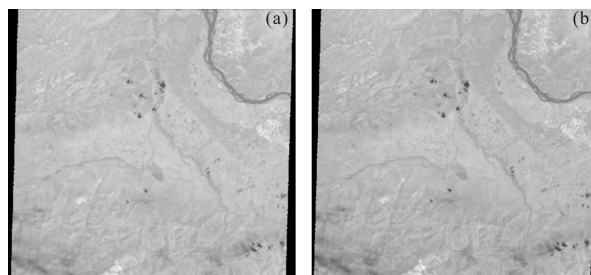


图 6 仿真生成图像和 ASTER 遥感图像

Fig.6 Simulated image and ASTER's image

表 3 仿真图像和真实遥感图像数据对比

Tab.3 Comparison of simulated image and ASTER's image

Statistical values	Simulated image	ASTER's image
Mean/ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	8.929 4	8.818 2
Median/ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	10.571 6	10.439 6
Maxima/ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	14.211 7	14.198 8
Standard deviation	3.842 1	3.794 9

从算例结果来看, 仿真图像在辐射数值和纹理特征上与真实场景都较为一致。

5 结束语

文中将热红外遥感反演技术应用于红外场景仿真, 极大简化了大规模地表场景仿真过程, 为空间下视系统红外场景仿真提供了一种直观、有效的新方法。综合考虑下视系统工作波段、视线指向、传感器视场角、阵列规模、地表起伏、大气辐射传输等因素, 建立了空间下视红外成像模型, 模拟生成的空间下视系统红外图像, 能够真实反映地表辐射量值, 且纹理细节特征丰富, 效果逼真, 可适用于百米以上中低尺度分辨率的各类空间下视红外场景仿真。

参考文献:

- [1] Han Yuge, Xuan Yimin. 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. 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.
- [2] Liu Yan, Shen Guotu, Cai Jiguang, et al. Improved sea surface radiation models[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 19–22. (in Chinese)
刘燕, 沈国土, 蔡继光, 等. 改进的海面辐射模型[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 19–22.
- [3] Jia Jianke, Zhang Linxi. Research of infrared imaging guidance simulation techniques based on Vega [J]. *Journal of Projectiles, Rockets Missiles and Guidance*, 2005, 25(4): 876–890. (in Chinese)
贾建科, 张麟兮. 基于 Vega 的红外成像制导仿真技术研究[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(4): 876–890.
- [4] Li Kuo, Yin Qingling, Hu Bo. Vega photoelectricity scene simulation technology based on HLA [J]. *Eletro-Optic Technology Application*, 2010, 25(3): 81–84. (in Chinese)
李阔, 尹庆林, 胡波. 基于 HLA 的 Vega 光电场景仿真技术研究[J]. 光电技术应用, 2010, 25(3): 81–84.
- [5] Gu Youlin, Qiao Yanli, Yi Weining. Application of satellite image in the scene simulation of thermal infrared [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 247–249. (in Chinese)
顾有林, 乔延利, 易维宁. 星影像在热红外场景仿真中的应用[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 247–249.
- [6] Zhang Junhua, Shen Guotu, Yang Baocheng, et al. Study of IR characteristics of a true earth's surface [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(4): 484–487. (in Chinese)
张俊华, 沈国土, 杨保成, 等. 真实自然地表的红外辐射特性研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(4): 484–487.
- [7] Wang Chunlei, Chao Hui, Sun Di. Algorithm research about retrieval of land surface temperature with estimated emissivity [J]. *Journal of Hebei United University (Natural Science Edition)*, 2014, 36(3): 86–91.
王春磊, 晁晖, 孙迪. 基于比辐射率先验的热红外反演地表温度算法[J]. 河北联合大学学报(自然科学版), 2014, 36(6): 86–91.
- [8] Li Hongning, Bai Tingzhu, Cao Fengmei, et al. Infrared Imaging Model for Scene simulation and its validation [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2010, 29(1): 57–62. (in Chinese)
李宏宁, 白廷柱, 曹峰梅, 等. 用于场景仿真的红外成像模型及其有效性分析 [J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(1): 57–62.
- [9] Jean-Pierre Gambotto, Vincent Leroy. IR scene generation under various conditions from segmented real scenes [C]// SPIE, 1993, 1967: 27–38.