

基于天基定量实测数据的月球长波红外辐射特性研究

马岩 张帅 刘元 马驰

Lunar long-wave infrared radiation characteristics based on space-based quantitative measured data

MA Yan, ZHANG Shuai, LIU Yuan, MA Chi

引用本文:

马岩, 张帅, 刘元, 马驰. 基于天基定量实测数据的月球长波红外辐射特性研究[J]. *中国光学*, 2022, 15(3): 525–533. doi: 10.37188/CO.2021–0202

MA Yan, ZHANG Shuai, LIU Yuan, MA Chi. Lunar long-wave infrared radiation characteristics based on space-based quantitative measured data[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 525–533. doi: 10.37188/CO.2021–0202

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0202>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于红外辐射特性系统实现对面目标测量

Opposite target measurement based on infrared radiation characteristic system

中国光学. 2018, 11(5): 804 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0804>

人工触发闪电通道的辐射特性分析

Analysis of radiation evolution characteristics of the artificial triggered lightning channel

中国光学. 2019, 12(3): 670 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0670>

国外地球同步轨道目标天基光学监视策略

Review of foreign space-based optical surveillance strategies for GEO objects

中国光学. 2017, 10(3): 310 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0310>

双压电片镜在同步辐射光源光学系统中的应用

Application of bimorph mirror in the optical system of synchrotron radiation light source

中国光学. 2017, 10(6): 699 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0699>

新型有机晶体及超宽带太赫兹辐射源研究进展

Advances in organic nonlinear crystals and ultra-wideband terahertz radiation sources

中国光学. 2019, 12(3): 535 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0535>

基于MAX9259/MAX9260的CameraLink图像数据光纤传输技术

CameraLink image data fiber transmission technology based on MAX9259/MAX9260

中国光学. 2018, 11(6): 1017 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.1017>

文章编号 2095-1531(2022)03-0525-09

基于天基定量实测数据的月球长波 红外辐射特性研究

马岩¹, 张帅^{1*}, 刘元¹, 马驰²

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;

2. 长光卫星技术有限公司, 长春 130102)

摘要:月球是理想的在轨辐射定标源, 为提高卫星等在轨航空器的长波红外辐射测量精度, 本文开展了月球长波红外辐射特性研究。通过分析月球辐射来源类型、辐射探测机理和建立辐射探测模型, 探寻点目标/圆盘目标模式下月球的长波红外辐射规律, 并依据天基实测数据计算其定标应用精度。首先, 从月球自身辐射和反射太阳辐射两方面研究月球辐射, 精确拟合月表温度, 建立月球红外辐射模型, 仿真两部分天基卫星辐射探测结果与月相角的数学关系; 其次, 对卫星红外载荷进行地面辐射定标, 获得图像灰度-辐照度之间转换的关键参数, 进而建立了月球长波红外辐射探测模型; 最后, 通过“吉林一号”对月拍摄实测数据, 反演计算了探测模型中月表的反射率和发射率。实验结果表明: 本文所得的月表长波红外辐射特性结果准确、鲁棒性高, 与 Apollo 12070 实验室测量结果、Diviner 实测数据拟合结果相比, 月球发射率和反射率的误差分别约为 7.18% 和 5.71%。

关键词:月球; 长波红外辐射; 天基定量实测数据; 辐射特性

中图分类号: O432.2; TP732.2 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2021-0202

Lunar long-wave infrared radiation characteristics based on space-based quantitative measured data

MA Yan¹, ZHANG Shuai^{1*}, LIU Yuan¹, MA Chi²

(1. Beijing Institute of Tracking Telecommunications Technology, Beijing 100094;

2. Chang Guang Satellite Technology Co. LTD, Changchun 130102)

* Corresponding author, E-mail: zhangshuaioec@163.com

Abstract: The moon is an ideal on-orbit radiation calibration source. In order to improve the measurement accuracy of long-wave infrared radiation for satellites and other on-orbit aircrafts, the characteristics of lunar long-wave infrared radiation are studied in this paper. The law of lunar long-wave infrared radiation is explored taking the moon as a point target or disk target, and the calibration accuracy is calculated based on the measured space-based data by analyzing the types of lunar radiation sources and radiation detection mechanism, and by establishing a radiation detection model. First, the lunar radiation is studied from two aspects of lunar self radiation and reflected solar radiation. The lunar surface temperature is fitted accurately, the lunar

收稿日期: 2021-11-21; 修订日期: 2021-12-16

基金项目: 国家自然科学基金重大项目重点课题(No. 61890965)

Supported by the Key Subject of National Natural Science Fund Major Project of China (No. 61890965)

infrared radiation model is established, and the mathematical relationship is simulated between the radiation measurement results of space-based satellites and the lunar phase angles. Second, the key parameters of conversion between gray-scale and irradiation images are obtained through calibrating the radiation of satellite infrared loads in the ground. The lunar long-wave infrared radiation measurement model is then established. Finally, the reflectance and emissivity of the lunar surface are calculated based on the measured data taken by the “Jilin-1” satellite on the moon. The experimental results show that the long-wave infrared radiation characteristics of the lunar surface obtained by the proposed method are accurate and robust. Moreover, there are nearly 7.18% and 5.71% of the fitting errors in the obtained data compared with Apollo 12 070 laboratory measurement results and diviner measured data, respectively.

Key words: moon; long-wave infrared radiation; space based quantitative measured data; radiation characteristics

1 引言

作为地球唯一的天然卫星,月球的红外辐射特性得到了广泛研究和关注,高精度的月球红外辐射数据对于人类开展航天、太空研究具有重要意义和参考价值。国内外开展了大量的月球观测和探测工程,通过地基观测、实验室测量、人造飞行器登月探测、在轨卫星测量等方式获取了丰富的月球红外辐射特性测量数据^[1-3]。这些数据具有广泛的应用领域,主要体现在三个方面:第一,月球可作为理想的辐射定标源。月球的红外辐射具有较高的稳定性,在太阳、月球和观测点几何位置关系确定的前提下,在轨仪器观测到的月球辐照度保持不变,根据长期观测结果,可建立在轨仪器入瞳辐射量和输出值之间的关系,进而完成定标。这种方式具有不依赖地面定标场、不受大气影响、观测频次高等优势,避免了发射振动冲击、天地环境温度改变、仪器自身衰减等因素的干扰,是良好的卫星在轨辐射定标源^[4]。美国的 MODIS^[5]、SeaWiFS^[6]、VIIRS 等、我国的风云三号 C 星^[7] 等卫星光学传感器载荷均具备对月进行辐射定标的功能。第二,研究分析月球红外辐射特征可以反演月表亮温的时空变换规律,为月壤浅层物质的物理化学和地理分布特性研究提供数据支撑。第三,月球是天基遥感的主要杂光干扰源之一,掌握月球的辐射特性,可用于指导天基载荷消杂光的有效设计。

在月表反射和热发射辐射模型中,月表光谱反射率和发射率数据的准确程度,直接关乎月球

辐射测量精度。美国在实验室对 Apollo 样品进行多个方向测量得到了月表光谱发射率;美国 LRO 卫星的 Diviner 辐射计测量了 0.35 μm ~2.8 μm 波段的月表反照率、测量了 7.55 μm ~8.05 μm 、8.10 μm ~8.68 μm 波段的月表成分辐射,根据 4 个远红外波段辐射精确计算了月表温度。目前,国际通用的月球辐射模型包括 ROLO 模型和 MT2009 模型:ROLO 模型是基于大量月球和恒星图像进行积分求和计算月球等效辐照度的,其中,月球高光谱等效圆盘反射率数据是根据 Apollo 采集的高光谱月壤和通过对原始观测的 32 个通道的等效圆盘反射率进行插值融合处理得到的,但是波段范围仅为 300 nm~2550 nm;MT2009 模型认为各向异性反射率的月面特征对月球辐射的影响没有量化,未在最终模型中进行修正^[8]。根据以上测量方式分析可总结得到:实验室不同角度的局部观测结果与更大尺度的观测结果一致性不高,而地基测量方式依赖于其他恒星的定标结果,且受大气吸收的影响明显,故在轨卫星测量和绕月测量是更为理想的测量方式。

Diviner 的温度探测结果精确,有利于准确计算月球辐射出射度,但是月表地形复杂,其二向反射特性难以有效拟合,不利于准确获取月表辐射模型参数。着眼在轨卫星红外辐射定标等应用,月球探测具有距离远、红外载荷空间分辨率低、辐射测量精度要求高等特点。基于此,本文将月球等效为圆盘或点状目标,通过对红外载荷进行地面辐射定标,对月球自身辐射和反射太阳辐射两项来源进行测量和反演计算,建立月球红外辐射探测模型。在探测模型

中,由于月表的热发射和反射强度都以辐射强度的形式被卫星所探测,本文将月表这两种特性统称为月表辐射特性。同时,根据商用在轨卫星“吉林一号”的实测数据,求取模型关键参数,研究月表长波红外辐射特性。最后将计算求得的月表反射率与 Apollo 12070 实验室测量结果、LRO 卫星 Diviner 的实测数据拟合结果进行比较。

2 月球长波红外辐射探测模型

月球辐射模型按照数据的来源可大致分为数据拟合和物理模型两大类。典型月球辐射模型:ROLO 模型和 MT2009 模型,属于数据拟合类,其波段只包含了部分近红外波段(1~2.5 μm 和 1~2.8 μm)。本文模型着眼于天基应用需求,旨在获取月球长波红外辐射模型。按照辐射来源分析,月球的红外辐射来源主要包括自身辐射和太阳辐射的反射。

2.1 月球辐射模型

2.1.1 月球温度和自身辐射

根据普朗克辐射定律,一个绝对温度为 $T(K)$ 的黑体,会向其周围整个半球空间内辐射能量,且能量的大小只与温度和波长相关。根据

Stenfen-Boltzmann 定律,在太阳辐射和月球内部热流两个主要热源的作用下,月表按照温度的四次方向外辐射热量。通常月表温度主要按照月阳面和月阴面分别进行仿真计算。根据 Diviner 的 GCP(Global Cumulative Products)数据库,给定月球任意经纬度和月球任意地方,可以生成月表的瞬时温度图。根据实践经验,Leblanc 和 Chaufray 提出了月阳面的温度解析式^[9]:

$$T(\psi) = T_0 \cos^n(\psi) + T_1 \quad (1)$$

式中, ψ 为月相角,根据 Diviner 的数据拟合结果,得到 $T_0 = 262$ 、 $n = \frac{1}{2}$ 和 $T_1 = 130$ 。

月阴面温度可通过下式近似得到^[10]:

$$T(\theta, \psi) = \sum_{i=0, \dots, 5} (a_i \psi^i) + 35(1 - \sin \theta), \quad \psi \in \left[\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \right] \quad (2)$$

式中, θ 和 ψ 分别为月阴面的经纬度, $a = [444.738, -448.937, 239.668, -63.8844, 8.34064, -0.423502]$ 。根据式(1)和式(2),可得月表阳面(月球地方时 12 点)和阴面的温度仿真结果,如图 1 所示,可看出:月阳面温度关于太阳直射经度线对称,且随着纬度的增加,温度逐渐降低;月阴面温度整体偏低,图中左侧小部分温度较高,是由于这部分区域在月球日落后存在热惯量现象。

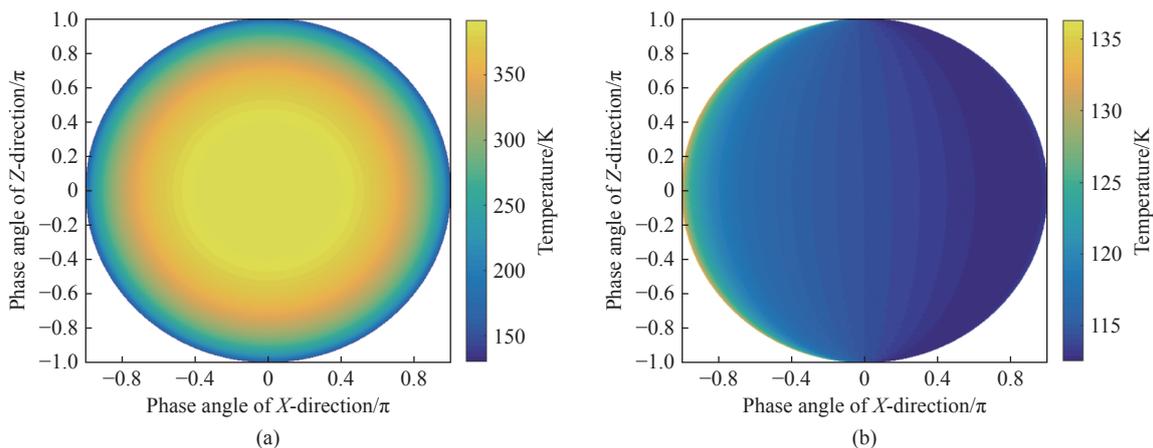


图 1 (a)月表阳面和(b)月表阴面温度仿真结果

Fig. 1 Simulation results of the temperatures on the (a) sunny and (b) shady sides of the lunar surface

根据月相角的定义:月相角为“太阳到月球”与“地球到月球”两个矢量的夹角,本文定义观测相位角为“太阳到月球”和“月球到探测器”两个矢量的夹角。在不同探测器相位角条件下,探测

器所接收的来自月表自身的热辐射主要包括两部分:太阳照射的部分月阳面和部分月阴面。其中,探测器所能观测的部分月阳面所占月表半球的比例为^[11]:

$$k = (1 + \cos \theta) / 2 \quad , \quad (3)$$

式中, θ 为探测器观测相位角。

因此, 根据普朗克定律, 探测器所观测到的月表区域分为月阳面和月阴面, 其辐射出射度可通过下式计算。

$$E_m = k \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\Omega_1} \frac{c_1}{(e^{c_2/\lambda T_1} - 1)\lambda^5} d\lambda d\Omega + (1-k) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\Omega_2} \frac{c_1}{(e^{c_2/\lambda T_2} - 1)\lambda^5} d\lambda d\Omega \quad , \quad (4)$$

式中, c_1 为第一辐射常数, $c_1 = 3.7415 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, c_2 为第二辐射常数, $c_2 = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, Ω_1 、 Ω_2 为探测器所观测到的月阳面和月阴面, k 为月阳面比例, T_1 为观测的月阳面温度, T_2 为观测的月阴面温度。

考虑到月表绝大部分覆盖着一层由尘土、非集结性岩块、碎屑和玻璃熔融物质组成的月壤, 月表辐照度计算需将发射率因素考虑在内^[12]。月球自身辐射模型中的光谱辐射出射度修正为:

$$E_{Ra}(\lambda, T) = E_m(\lambda, T) \cdot \varepsilon(\lambda, T) \quad , \quad (5)$$

式中, ε 为月球表面在某温度下的光谱发射率, E_m 、 E_{Ra} 分别为相应温度下月表自身理论和实际光谱辐射出射度。

月表的发射率主要取决于月表物质特性和波长, 国内外有许多实验室条件下的月壤发射率测试及结果。但是, 由于月表的复杂性和多种影响因素, 月表的发射率不是固定不变的, 月表整体的平均发射率难以通过拟合得到。本文旨在通过将月亮等效为月圆盘或点目标来研究月表的平均等效发射率, 此种条件下, 认为月表物质特性相似。

综上, 探测器接收来自月表自身辐射的辐照度为:

$$E_{Ra}(\lambda) = E_{Ra}(\lambda, T) \cdot \left(\frac{R_m}{\bar{r}_{me}}\right)^2 \quad , \quad (6)$$

式中, R_m 为月球半径 1738 km, \bar{r}_{me} 为平均地-月距离 384000 km。

2.1.2 月球反射辐射

太阳发出的红外辐射照射到月表上后, 会有一部分辐射经反射并传输到探测器中响应, 这一过程与 ROLO 和 MT2009 模型的原理类似。太阳辐射具有各项同性的特性, 太阳常数(1 AU 处的太阳辐射出射度)的波动范围一般为 1363.0~

1368.0 W/m²。本文采用太阳辐射模型, 并通过 Solar Radiation and Climate Experiment(SORCE)数据进行修正, 通过积分计算太阳不同光谱波段范围内的辐射出射度。

由于月表地势复杂, 月表上月海与高地对太阳光的反射程度不同, 而且反射效果与太阳光的入射角、观测几何、较大温差相关, 故难以有效构造月表反射模型。影响月表反射太阳辐射出射度的主要因素有: 太阳光谱辐照度 E_0 、月表反射率 α 、日-月距离 r_{sm} 、月相角 θ_p 、探测器光轴方向 φ 。在诸多因素中, 月表反射率是月球的固有属性, 而月表温度的变化主要是由于不同月相角下, 接收的太阳辐射能量不同, 因此, 月表反射模型的关键在于求取不同月相角下的反射率。经验证, 通过已知波段的反射率信息拟合的结果精度较差。对于月球这种不透明的物体, 可等效为半径 1738 km 的理想灰体, 根据基尔霍夫定律, 其光谱发射率和反射率的关系为:

$$\varepsilon_\lambda(\lambda) + \alpha_\lambda(\lambda) = 1 \quad . \quad (7)$$

太阳可等效半径为 $6.69 \times 10^5 \text{ km}$ 、温度为 5772 K 的黑体, 其在研究波段的辐射出射度为:

$$E_0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{(e^{c_2/\lambda T} - 1)\lambda^5} d\lambda \quad . \quad (8)$$

经距离因子修正后到达月球的太阳辐射照度为:

$$E_\lambda = E_0 \cdot \left(\frac{R_s}{\bar{r}_{sm}}\right)^2 \quad , \quad (9)$$

$$\bar{r}_{sm} = \sqrt{(\bar{r}_{se}^2 + \bar{r}_{me}^2 + 2\bar{r}_{se}\bar{r}_{me}\cos(\theta))} \quad , \quad (10)$$

式中, θ 为观测相位角, R_s 为太阳半径, \bar{r}_{se} 为平均日地距离 1AU($1.496 \times 10^8 \text{ km}$), \bar{r}_{sm} 为平均日月距离。

在低分辨率条件下, 月球可等效为理想的漫反射体, 反射规律满足朗伯定律, 观测相位角对月表反射的太阳辐照度的影响如下。

$$E_\theta = k \cdot E_\lambda \cdot [(\pi - \theta)\cos\theta + \sin\theta] \quad , \quad (11)$$

式中, k 为月阳面比例, 见公式(3)。

经反射率和距离因子修正后, 探测器接收来自月表所反射的太阳辐照度为:

$$E_{Re}(\lambda) = \alpha(\lambda, T) \cdot E_\theta \cdot \frac{2\pi R_m^2}{4\pi \bar{r}_{me}^2} \quad . \quad (12)$$

综上, 本文月表反射模型主要涉及的参数包括反射率、月相角和积分波段, 故可通过天基实测数据来推算上述参数, 进而建立准确的月表反射模型。

2.2 红外相机辐射定标

为了给月球在轨辐射定标研究提供准确的红外辐射数据, 准确获取到达相机处的辐照度, 需要在地面对红外相机进行辐射定标: 即建立探测器 DN 值与相机入瞳处辐照度的一一对应关系。通过响应度拟合曲线可将拍摄图像的灰度值转换为光谱辐亮度值。

$$L = DN \times gain + bais, \quad (13)$$

式中, L 为辐射定标物体的辐亮度, $gain$ 和 $bais$ 为响应度拟合函数, DN 为探测器所得图像中定标物体的灰度值。

本文采用黑体对相机进行辐射定标, 在某一曝光条件下采集到的试验数据如图 2 所示, 进而可拟合得到相机的响应度曲线。

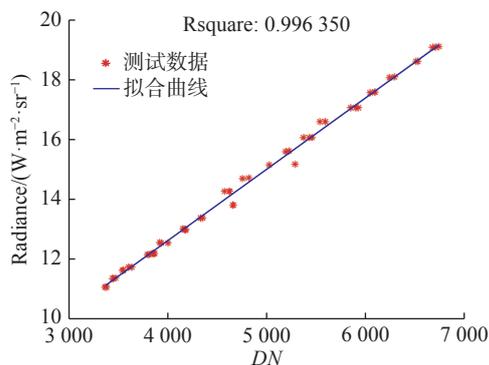


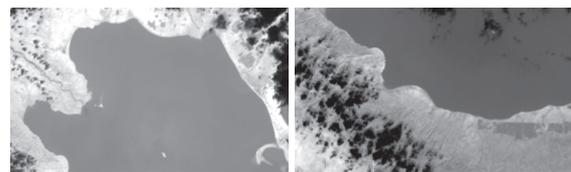
图 2 相机的辐射-灰度定标结果

Fig. 2 Radiometric gray-scale calibration results of camera

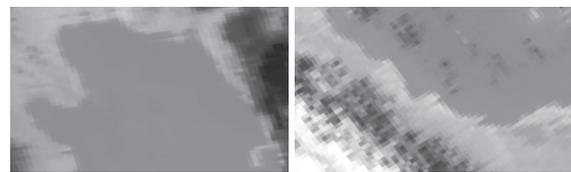
由于发射过程中的振动冲击、仪器衰减、温度改变均会引起卫星地面辐射定标参数的变化, 需要对地面定标系数进行在轨性能评估^[13]。本文选取波段设置相似的载荷作为参考传感器进行交叉定标, 验证发射前定标系数在轨应用的可行性。“吉林一号”卫星长波红外的中心波长为 $10.72 \mu\text{m}$, MODIS Band31 长波红外的中心波长为 $11 \mu\text{m}$, 故选用 MODIS Band31 进行交叉定标验证。

各航天大国一般选择辐射特性均匀稳定的地面目标作为“标准”进行卫星观测的校准试验^[14-15]。经数据查询与筛选, “吉林一号”卫星分别于 2019 年 7 月 12 日和 2019 年 8 月 13 日对青

海湖进行两次长波红外拍摄, 而 MODIS 与“吉林一号”卫星对青海湖的成像时间仅相差 24 min, 观测天顶角仅相差 7° 。因此, 采用这两次成像时间、两卫星对青海湖的成像进行交叉定标验证。MODIS 与“吉林一号”卫星长波红外相机对青海湖的成像缩略图如图 3 所示, 选取避开云雾后的 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 大小的局部均匀湖面 (36.82°N , 100.07°E) 作为测试对象, 并测量其平均观测辐亮度。在第一次的测试结果中, “吉林一号”卫星和 MODIS Band31 的观测辐亮度分别为 $7.95 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ 和 $7.67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$, 第二次结果分别为 $7.99 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ 和 $7.89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$, 两次测量误差分别为 3.65% 和 1.27%。交叉验证结果说明, 使用地面定标系数获取的在轨数据较为可靠, 其在轨辐射测量结果是可信的。



(a) “吉林一号”卫星于 2019 年 7 月 12 日和 2019 年 8 月 23 日拍摄的图片
(a) The images captured by the “JiLin” satellite on July 12, 2019 and August 23, 2019



(b) MODIS 于 2019 年 7 月 12 日和 2019 年 8 月 23 日捕获的图片
(b) The images captured by the MODIS on July 12, 2019 and August 23, 2019

图 3 “吉林一号”卫星和 MODIS 对青海湖局部拍摄缩略图

Fig. 3 Partial thumbnails of Qinghai Lake taken by “JiLin-1” satellite and MODIS

在对月球的实际拍摄试验中, 由于图像中月球所占像素大于 100 个像素, 根据本文的研究背景, 可将月球视作圆盘进行辐照度积分运算。建立图像灰度值与探测器接收的月球辐照度关系为:

$$E'_m = \sum_{i,j} (DN_{i,j} \times gain + bais) \times \Theta, \quad (14)$$

式中, E'_m 为月球在相机入瞳处的辐照度, $DN_{i,j}$ 为拍摄图像中月盘任意像素点位置的灰度值, Θ 为相机的瞬时视场角。

3 月球长波红外辐射特性测试与仿真分析

3.1 实验设置

为深入研究将月球等效为点目标时的长波辐射特性,采用“吉林一号”光谱星搭载的红外相机进行对月拍摄,光谱星的轨道高度为 550 km,为太阳同步卫星,选择非阴影区进行拍摄。光谱星长波红外相机采用面阵探测器,其可在轨调节相机曝光时间和增益,进而保证拍摄目标输出较高的灰度值且不饱和,相机主要参数如表 1 所示,长波红外相机结构如图 4(a)所示。长波红外相机

载荷对月分辨率约为 109 km,满月状态下,月球在图像中所占区域约为 32 pixel×32 pixel,所拍摄的满月图像如图 4(b)所示。

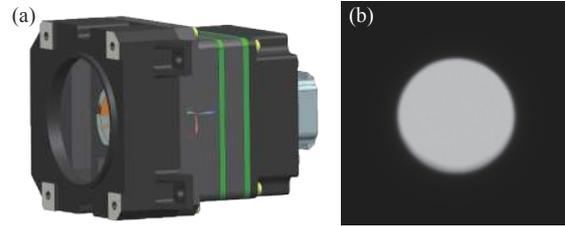


图 4 (a)“吉林一号”长波红外探测器模型及(b)其拍摄的月球图片

Fig. 4 (a) Simulation model of long-wave infrared detector of “Jilin-1” satellite and (b) lunar long-wave image captured by “Jilin-1” satellite

表 1 “吉林一号”长波红外相机的主要参数

Tab. 1 Main parameters of the long-wave infrared camera of “Jilin-1” satellite

波段/ μm	焦距/mm	相对孔径	分辨率	视场角/ $^{\circ}$	帧频/(frame·s $^{-1}$)	像元尺寸/ μm	NETD/mK
8-12.5	60	1.17	640×512	13.3	7.49	17	≤ 50

2020 年 3 月-4 月,“吉林一号”累计有效执行了 14 次月球拍摄任务,具体拍摄信息如表 2 所示。从表中可看出,在不同拍摄时间,太阳、月亮及卫星的相对距离在不断变化,其中,日-月距离

平均相对变化约为 0.35%,卫星-月间距离的平均相对变化约为 3.28%。距离变化会引起月球在卫星处辐照度的变化,因此需要对其进行修正。

表 2 “吉林一号”对月拍摄信息参数

Tab. 2 Information parameters of Moon captured by the “Jilin-1” satellite

次序	观测相位角/ $^{\circ}$	拍摄时间(北京时间)	日-月距离(km)	卫星-月距离(km)
1	5.72	2020年4月8日 7:43:23	150 155 484.4	350 339.7
2	8.27	2020年3月9日 6:39:14	148 890 326.3	351 319.3
3	9.31	2020年3月10日 14:28:26	148 927 699.1	350 427.7
4	12.38	2020年4月7日 7:54:26	150 106 457.9	350 231.5
5	18.04	2020年4月9日 7:32:23	150 185 032.4	352 748.4
6	21.36	2020年3月8日 6:50:16	148 834 109.5	354 435.4
7	22.75	2020年3月11日 6:17:15	148 946 142.6	351 837.0
8	24.35	2020年4月6日 11:15:29	150 048 417.8	352 037.6
9	31.79	2020年4月10日 7:21:23	150 196 149.6	357 210.6
10	35.91	2020年3月7日 5:25:19	148 754 960.4	359 974.6
11	38.34	2020年4月5日 11:25:29	149 964 953.0	356 162.6
12	45.33	2020年4月11日 7:11:23	150 191 076.5	363 431.2
13	52.86	2020年4月4日 10:01:29	149 859 532.7	362 171.6
14	58.38	2020年4月12日 7:00:23	150 172 914.8	370 550.0

3.2 数据分析与处理

为了更直观地观测月球辐照度数据,进而分析月球作为等效点目标的辐射特性,本文按照月球自身辐射和对太阳的反射两种模型分别进行仿真。在月球自身辐射模型中,月球辐射出射度主要受温度和发射率影响,而温度变化主要是由月相角变化所引起的。假设月球的发射率为0.8,到达卫星的月球辐射出射度与月相角的关系如图5(彩图见期刊电子版)所示,蓝色圆圈为根据表2数据计算得到的“吉林一号”观测结果,红色曲线为拟合结果。从图中可看出,在5°到60°范围内,随着观测相位角的增加,卫星所接收到的月球自身长波红外辐射逐渐降低,辐照度的量级约为 10^{-3} W/m²。同时,在5°到60°的月相角变化过程中,卫星所探测到的阳光照射到的月表面积逐渐减少,所接收的辐照度逐渐降低,验证了实际探测结果是符合客观规律的。

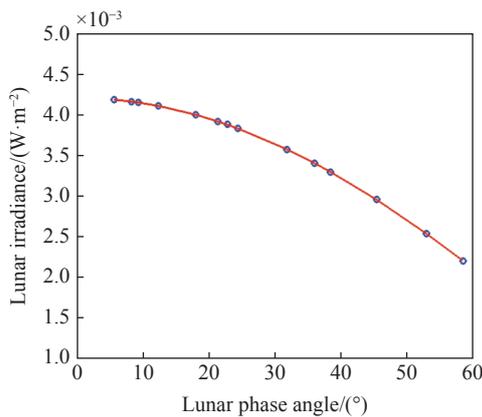


图5 “吉林一号”接收月球自身辐照度与月相角关系的仿真结果

Fig. 5 The simulation results for the relationship between the lunar's own irradiance received by the “Jilin-1” satellite and lunar phase angle

在月球反射太阳辐射模型中,反射辐射出射度主要与月相角、反射率相关,根据表2数据,假设月球的反射率为1,到达卫星的月球反射太阳辐射出射度与月相角的关系如图6(彩图见期刊电子版)所示,蓝色圆圈为据表2数据计算得到的“吉林一号”观测结果,红色曲线为拟合结果。从图中可看出,在5°到60°范围内,随着观测相位角的增加,卫星处所接收的月球反射太阳长波红外辐射降低,辐照度的量级约为 10^{-5} W/m²。同上段分析类似,卫星接收到的太阳光照射的月表面

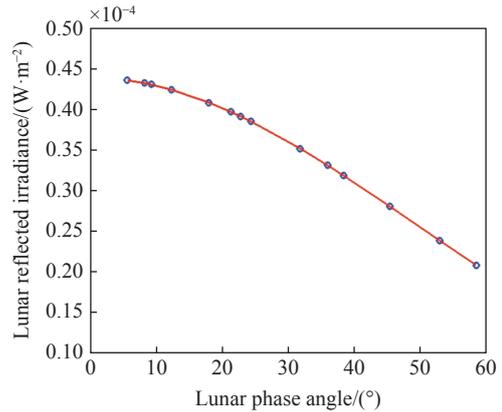


图6 “吉林一号”接收月球反射太阳辐照度与月相角关系的仿真结果

Fig. 6 The simulation results for the relationship between the reflected solar irradiance received by the “Jilin-1” satellite and lunar phase angle

积随月相角从5°到60°而降低,与实际规律保持一致。

根据探测器的定标结果,对“吉林一号”卫星长波红外载荷拍摄月球的数据进行反演,得到月球在卫星处的辐照度实测值,如表3所示。同时,根据月球长波红外辐射模型及两种来源的辐射值,研究月表的长波红外辐射特性,计算月球等效点目标的反射率。

表3 “吉林一号”长波辐射实测反演结果

Tab. 3 Measured inversion results of the long-wave radiation from the “Jilin-1” satellite

次序	观测相位角/(°)	长波红外辐射照度实测反演结果/(W·s ⁻²)
1	5.72	0.00493332
2	8.27	0.00492300
3	9.31	0.00487956
4	12.38	0.00470402
5	18.04	0.00449120
6	21.36	0.00441650
7	22.75	0.00438659
8	24.35	0.00418648
9	31.79	0.00387823
10	35.91	0.00371954
11	38.34	0.00350546
12	45.33	0.00317342
13	52.86	0.00273809
14	58.38	0.00493332

为验证本文结果的准确性,分别与 Apollo 12070 月壤实验室测试结果(0.95)^[16]和 LRO 的 Diviner 测试数据^[17]进行比较。LRO 的 Diviner 测试数据中, Ch3: 7.55~8.05 μm , Ch4: 8.1~8.4 μm , Ch5: 8.4~8.7 μm , Ch6: 13~23 μm 。为合理验证本文结果,采用拟合方式计算 LRO 在 8~12.5 μm 的月表发射率,结果为 0.8358。

本文中,月球等效点目标的长波红外波段(8~12.5 μm)的反射率计算结果如图 7(彩图见期刊电子版)所示,蓝色圆圈及连接线为月球的发射率结果,红色圆圈及连接线为月球的反射率结果,发射率的均值为 0.8958,方差为 0.0328。从结果可看出,在长波红外(8 μm ~12.5 μm)范围内,月球等效为点目标时的发射率约为 0.9,与 Apollo 12070 月壤、Diviner 的结果误差分别为 7.18% 和 5.71%,本文结果的鲁棒性较高。但是,由于

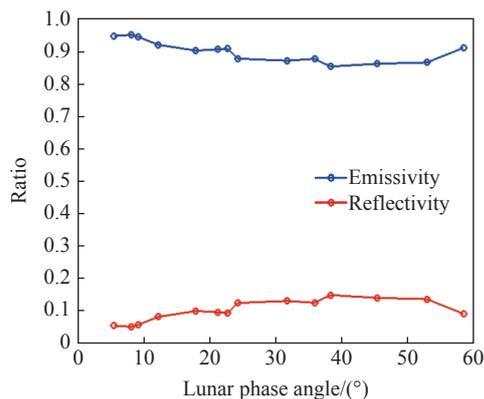


图 7 月球等效点目标长波红外发射率和反射率

Fig. 7 Long-wave infrared emissivity and reflectivity of lunar equivalent point target

参考文献:

- [1] 朱军, 李永昌, 白照广, 等. 低轨高分辨率遥感卫星姿态机动对月定标方法[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(9): 1913-1923.
ZHU J, LI Y CH, BAI ZH G, *et al.*. Lunar calibration method through attitude maneuver of low-earth-orbit and high-resolution remote sensing satellites[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(9): 1913-1923. (in Chinese)
- [2] NODA H, ARAKI H, GOOSSENS S, *et al.*. Illumination conditions at the lunar polar regions by KAGUYA(SELENE) laser altimeter[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(24): L24203.
- [3] BUSSEY D B J, MCGOVERN J A, SPUDIS P D, *et al.*. Illumination conditions of the south pole of the Moon derived using Kaguya topography[J]. *Icarus*, 2010, 208(2): 558-564.
- [4] KIEFFER H H. Photometric stability of the lunar surface[J]. *Icarus*, 1997, 130(2): 323-327.
- [5] EPLEE R E JR, SUN J Q, MEISTER G, *et al.*. Cross calibration of SeaWiFS and MODIS using on-orbit observations of the Moon[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(2): 120-133.
- [6] EPLEE R E JR, BARNES R A, PATT F S, *et al.*. SeaWiFS lunar calibration methodology after six years on orbit[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5542: 1-13.

LRO 的 Diviner 长波红外发射率未必与拟合结果完全一致,该误差存在一定的不确定性。总体而言,在获取准确月球发射率/反射率-月相角关系的基础上,可进一步拓宽月球辐射测量的时域,为在不同月相角条件下的月球长波红外辐射精确测量提供辅助,月球长波红外辐射定标源的全天时应用水平得到进一步提升。

4 结 论

本文针对红外载荷空间分辨率低的特点,将月球等效为点目标或圆盘目标对其展开长波红外辐射探测研究。首先,研究了月球辐射中的自身辐射和反射太阳辐射两项内容,论证了月表温度、探测距离、月相角、辐射特性等因素与辐射测量之间的关系。其次,对红外相机进行了地面辐射定标,获取了相机图像灰度与辐照度之间的转换参数,进而建立了月球红外辐射探测模型。最后,通过“吉林一号”商用卫星对月连续拍摄及辐照度测量,获取了天基月球长波红外辐射实测数据,分析了月球等效点目标或圆盘目标条件下的辐射特性,反演计算了其反射率约为 0.9,与 Apollo 12070 实验室月壤、Diviner 拟合的反射率数据误差分别约为 7.18% 和 5.71%,说明了本文所建月球辐射探测模型是准确的,月球长波红外辐射特性的研究结果是可靠、鲁棒的,为卫星在轨辐射定标提供了有效价值信息。在下一步工作中,将定量研究卫星外部环境、自身状态改变等因素带来的干扰,进而进一步提高定标精度。

- [7] 吴荣华,张鹏,杨忠东,等.基于月球反射的遥感器定标跟踪监测[J].遥感学报,2016,20(2):278-289.
WU R H, ZHANG P, YANG ZH D, *et al.*. Monitor radiance calibration of the remote sensing instrument with reflected lunar irradiance[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(2): 278-289. (in Chinese)
- [8] 张璐,张鹏,胡秀清,等.月球辐射照度模型比对及地基对月观测验证[J].遥感学报,2017,21(6):864-870.
ZHANG L, ZHANG P, HU X Q, *et al.*. Comparison of lunar irradiance models and validation of lunar observation on Earth[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(6): 864-870. (in Chinese)
- [9] LEBLANC F, CHAUFRAY J Y. Mercury and moon he exospheres: analysis and modeling[J]. *Icarus*, 2011, 216(2): 551-559.
- [10] HURLEY D M, SARANTOS M, GRAVA C, *et al.*. An analytic function of lunar surface temperature for exospheric modeling[J]. *Icarus*, 2015, 255: 159-163.
- [11] MEEUS J. *Astronomical Algorithms*[M]. Richmond: Willmann-Bell, 2005.
- [12] 路鹏,陈圣波,崔腾飞,等.月球表面矿物二向性反射特性实验研究[J].岩石学报,2016,32(1):107-112.
LU P, CHEN SH B, CUI T F, *et al.*. Experimental study on bidirectional reflectance characteristics of minerals on lunar surface[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(1): 107-112. (in Chinese)
- [13] 高帅,李元,白廷柱,等.交叉定标中的不确定度分析及定标系数计算改进[J].中国光学,2020,13(3):568-576.
GAO SH, LI Y, BAI T ZH, *et al.*. Uncertainty analysis in cross-calibration and optimization calculation of calibration coefficients[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 568-576. (in Chinese)
- [14] 李元,张勇,胡丽琴,等.中国遥感卫星辐射校正场敦煌戈壁场区光环境变化研究[J].中国光学,2021,14(5):1231-1242.
LI Y, ZHANG Y, HU L Q, *et al.*. Investigation of optical environment changes in the Dunhuang Gobi site of the Chinese radiometric calibration sites[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1231-1242. (in Chinese)
- [15] 刘群,刘崇,朱小磊,等.星载海洋激光雷达最佳工作波长分析[J].中国光学,2021,13(1):148-155.
LIU Q, LIU CH, ZHU X L, *et al.*. Analysis of the optimal operating wavelength of spaceborne oceanic lidar[J]. *Chinese Optics*, 2021, 13(1): 148-155. (in Chinese)
- [16] 牛明慧.光学遥感仪器月球定标技术研究[D].上海:中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所),2018:54-58.
NIU M H. *Research on the lunar calibration technologies of optical remote sensing radiometers*[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences), 2018: 54-58. (in Chinese)
- [17] REN H ZH, NIE J, DONG J J, *et al.*. Lunar surface temperature and emissivity retrieval from diviner lunar radiometer experiment sensor[J]. *Earth and Space Science*, 2021, 8(1): e2020EA001436.

作者简介:



马岩(1977—),男,山东菏泽人,硕士,北京跟踪与通信技术研究所研究员。研究方向为光电信息处理与分析、目标特性识别、数据计算技术, E-mail: Mayan888@sina.com。



张帅(1992—),男,山西吕梁人,博士,北京跟踪与通信技术研究所助理研究员。研究方向为目标特征提取与识别、光电信息处理。E-mail: zhangshuaioc@163.com