

Chen Chao, Qin Qiming, Lu Yan, Wang Jinliang, Zhang Ning. Research on photometric correction of lunar image from CCD stereo camera onboard Chang'E-1 satellite. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(1): 120-127

嫦娥一号 CCD 立体相机数据光度校正^{*}

陈超¹ 秦其明¹ 卢燕² 王金梁¹ 张宁¹

1(北京大学遥感与地理信息系统研究所 北京 100871)

2(中国地质大学地球科学与资源学院 北京 100083)

摘要 为更加精确拟合相函数系数, 得到较为准确的光度校正结果, 针对嫦娥一号 CCD 立体相机数据的特点, 对改进的 Lommel-Seeliger 模型中的 Lommel-Seeliger 因子进行修订, 使去除太阳入射角和传感器观测角影响的遥感图像数据能够更好地契合相位角的变化; 利用加入修订后 Lommel-Seeliger 因子的模型对嫦娥一号 CCD 立体相机数据进行逐像素光度校正; 选取同一轨道不同纬度和同一区域不同视角两组数据来验证算法的有效性和适用性. 实验结果表明, 该方法能够有效校正由于几何观测条件变化而引起的目标光谱特性的不一致性, 对于较亮和较暗区域的光度校正效果更为有效.

关键词 嫦娥一号, CCD 立体相机, 光度校正, Lommel-Seeliger 因子

中图分类号 V 44, TP 751

Research on Photometric Correction of Lunar Image from CCD Stereo Camera Onboard Chang'E-1 Satellite

CHEN Chao¹ QIN Qiming¹ LU Yan² WANG Jinliang¹ ZHANG Ning¹

1(Institute of Remote Sensing and Geographic Information System, Peking University, Beijing 100871)

2(School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083)

Abstract In order to fit coefficients of the phase function more accurately and obtain some accurate results, Lommel-Seeliger factor has been revised according to the characteristics of CCD stereo camera data of Chang'E-1. By effective revision, the incidence angle and instrument viewing angle effect have been removed. The corrected image data fit much better with the variable trend of phase angle. Then photometric correction on the CCD stereo camera data of Chang'E-1 has been carried out pixel by pixel using the improved Lommel-Seeliger photometric correction model introduced by the revised Lommel-Seeliger factor. Finally, this algorithm has been verified by two groups of data from different latitudes of the same orbit and different view angles of the same area, respectively. The experimental results show that this method could effectively correct the inconsistency of the spectral characteristics of the object induced by the change of observation conditions. Moreover, using this

* 国家高技术研究发展计划项目资助 (2010AA122202)

2011-09-14 收到原稿, 2012-04-06 收到修定稿

E-mail: chenchao_pku@163.com

method, photometric correction shows better performance even at brighter or darker areas.

Key words Chang'E-1, CCD stereo camera, Photometric correction, Lommel-Seeliger factor

0 引言

CCD 立体相机是嫦娥一号 (Chang'E-1) 探月卫星搭载的有效载荷之一, 主要用以获取满足三维立体重构要求的同一目标前视、正视 (星下点)、后视三幅月表二维平面图像。CCD 立体相机为一台三线阵 CCD 推扫相机, 实际上是在一个大面阵 CCD 探测器上, 分别读取垂直于飞行方向上的第 11 行、第 512 行和第 1013 行, 作为前视、正视和后视的图像阵列^[1]。CCD 立体相机的星下点空间分辨率为 120 m, 成像宽度为 60 km, 光谱范围为 0.50~0.75 μm , 量化等级为 8 bit^[1-5]。

Chang'E-1 CCD 立体相机获取的月表数据与传感器几何观测条件 (太阳入射角 i 、传感器观测角 e 、相位角 α 等) 及月表物质的性质 (矿物成分、月壤颗粒形状与大小、月壤致密度、月表粗糙度等) 等参数有关^[2-7]。在遥感图像上, 由于几何观测条件的不同, 同一目标呈现的表现特征也不相同。为了绘制全月球影像图, 更为精确地重构月表三维结构, 以及定量分析月球光谱, 进行不同区域间月表物质相互比较并与实验室光谱对照, 必须进行光度校正, 将 CCD 立体相机获取的月表数据归一化到标准视几何条件下 ($i = 30^\circ$, $e = 0^\circ$, $\alpha = 30^\circ$), 以消除由于几何观测条件变化而引起的目标光谱特性的不一致性^[7-9]。

随着行星科学的发展, 出现了大量的光度校正模型。对于可见光-近红外波段, 常用的光度校正模型包括 Lommel-Seeliger 模型 (布朗大学预处理方法)、改进的 Lommel-Seeliger 模型、Hapke 模型、Lunar-Lambert 模型 (McEwen 方法) 和 Kreslavsky 理论及一些衍生模型等。这些模型的不同之处主要在于对介质中多重散射和小相位角 ($0^\circ < \alpha < 10^\circ$) 几何观测条件下反向效应处理方式的不同^[7]。Lommel-Seeliger 模型只适用于精度不高的光度校正, 无法消除小相位角几何观测条件下产生的反向效应^[8]; Hapke 模型、Lunar-Lambert 模型和 Kreslavsky 理论及其衍生模型等采用了复杂的光度函数, 并且含有一些自由参数, 需要利用多角度观测数据来拟合^[9-15]。对于 Chang'E-1 CCD 立体相机数据来说, 实现难度

较大。因此, 针对 Chang'E-1 CCD 立体相机数据的特点, 光度校正模型这里采用了改进的 Lommel-Seeliger 模型。

针对改进的 Lommel-Seeliger 模型和 Chang'E-1 CCD 立体相机数据特点, 为得到较为准确的光度校正结果, 对 Lommel-Seeliger 因子进行修订, 使去除太阳入射角和传感器观测角影响的遥感图像数据能够更好地契合相位角的变化, 以更加精确地拟合相函数系数。进而, 选择同一轨道不同纬度和同一区域不同视角的两组数据, 分别使用带有 Lommel-Seeliger 因子和修订后 Lommel-Seeliger 因子的模型对其进行光度校正, 以验证本文方法的准确性、有效性和适用性。

1 研究方法及数据

1.1 研究方法

Chang'E-1 CCD 立体相机数据光度校正流程如图 1 所示。首先, 从 Chang'E-1 CCD 立体相机 2B 级数据出发, 提取图像数据和几何观测条件, 并根据图像数据大小, 对几何观测条件进行逐像素插值, 得到与每个图像数据相对应的几何观测条件; 其次, 使用修订后 Lommel-Seeliger 因子, 去除太阳入射角和传感器观测角对图像数据的影响; 再次, 利用去除太阳入射角和传感器观测角影响后的图像数据和相位角数据, 拟合相函数系数, 并对拟合后的相函数进行精度评价; 最后, 对图像数据进行光度校正, 并选择同一轨道不同纬度和同一区域不同视角两组数据, 验证光度校正结果。

1.2 数据

这里所用数据是经过暗电流校正、平场校正、几何粗校正的 Chang'E-1 CCD 立体相机 2B 级数据, 消除了由于月球自转、月球曲率、卫星高度和卫星姿态等引起的畸变。

以 PDS 格式存储、管理和发布的 Chang'E-1 CCD 立体相机 2B 级数据除包含图像数据外, 还附加有成像时的几何观测条件 (太阳入射角、太阳方位角、传感器观测角、传感器方位角、相位角、经度、纬度) 等参数, 以便进一步开展研究。在光度校正之

前, 必须进行数据预处理, 包括图像数据和几何观测条件的提取及几何观测条件的逐像素插值等操作。

2 光度校正

针对 Chang'E-1 CCD 立体相机数据特点, 这里采用改进的 Lommel-Seeliger 模型对其进行光度校正。Lommel-Seeliger 反射模型更加符合月表反射特性, 能够将暗目标的方向反射模拟得很好^[12]。改进的 Lommel-Seeliger 模型的相函数在原有四次多项式基础上增加了一个指数项, 用于消除小相位角几何观测条件下的反向效应, 而四次多项式项则用以模拟月表物质的多重散射和宏观粗糙度^[6-8]。

2.1 Lommel-Seeliger 因子的修订

在可见光-近红外波段, 遥感图像反映的主要是目标对太阳光的反射光谱特性, 其强度取决于几何观测条件和目标的固有属性, 而卫星成像过程中, 目标的表面状况等固有属性一般不会发生变化^[5-6]。因此, Chang'E-1 CCD 立体相机数据可以近似表达为几何观测条件的函数, 有

$$D(i, e, \alpha) = \frac{\mu_0}{\mu_0 + \mu} f(\alpha). \quad (1)$$

其中, $D(i, e, \alpha)$ 为光度校正前 Chang'E-1 CCD 立

体相机数据 (Digital Number, DN 值); $\frac{\mu_0}{\mu_0 + \mu}$ 为 Lommel-Seeliger 因子, μ_0 和 μ 分别为太阳入射角 i 和传感器观测角 e 的余弦, $f(\alpha)$ 为相函数, 具体表达为

$$f(\alpha) = b_0 e^{-b_1 \alpha} + a_0 + a_1 \alpha + a_2 \alpha^2 + a_3 \alpha^3 + a_4 \alpha^4. \quad (2)$$

其中, α 为相位角; a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 和 b_0, b_1 为待拟合的相函数系数。

由式 (1) 可以看出, Chang'E-1 CCD 立体相机数据主要由两部分控制, 一部分为太阳入射角和传感器观测角的函数 (Lommel-Seeliger 因子), 另一部分为相位角的函数 (相函数)。Lommel-Seeliger 因子关系到相函数系数拟合的优劣, 直接影响光度校正及后续研究 (例如反射率计算) 的效果。

在对 Lommel-Seeliger 因子和 Chang'E-1 CCD 立体相机数据特点充分了解的基础上, 为能更加精确地描述月表真实反射特性, 使去除太阳入射角和传感器观测角影响的图像数据更好地契合相位角的变化趋势, 将式 (1) 修订为如下形式:

$$D(i, e, \alpha) = \frac{\mu_0}{\mu_0 + \mu_0 \mu + \mu} f(\alpha). \quad (3)$$

其中, $\frac{\mu_0}{\mu_0 + \mu_0 \mu + \mu}$ 为修订后 Lommel-Seeliger 因子。

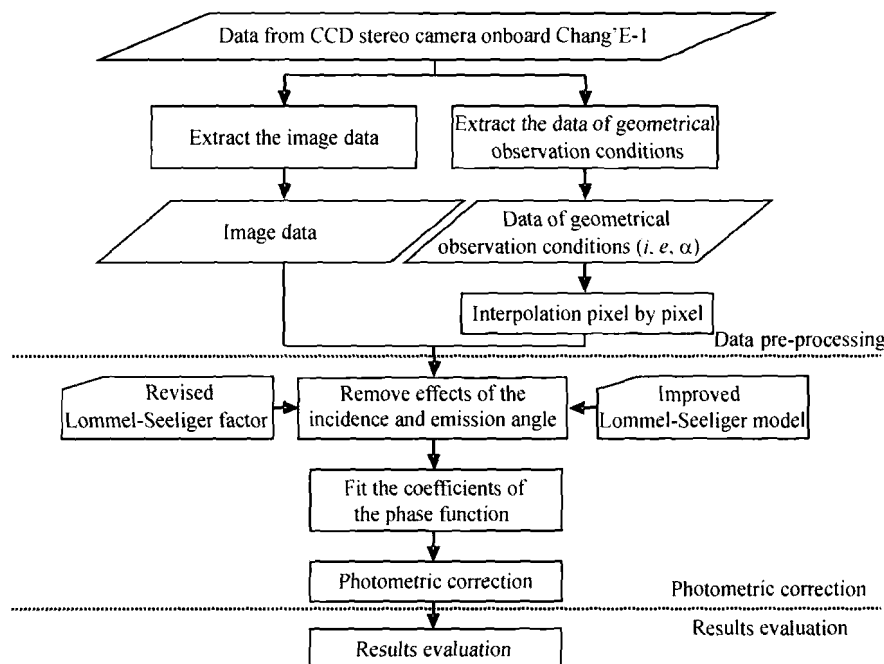


图1 Chang'E-1 CCD 立体相机数据光度校正流程

Fig.1 Flowchart of CCD stereo camera data photometric correction

2.2 精度评价

由于三个视角(前视、正视、后视)的 Chang'E-1 CCD 立体相机的图像数据和几何观测条件已知, 可

以利用最小二乘法拟合相函数系数.

图 2~4 分别为拟合的前视、正视和后视相函数曲线与去除太阳入射角和传感器观测角影响(由

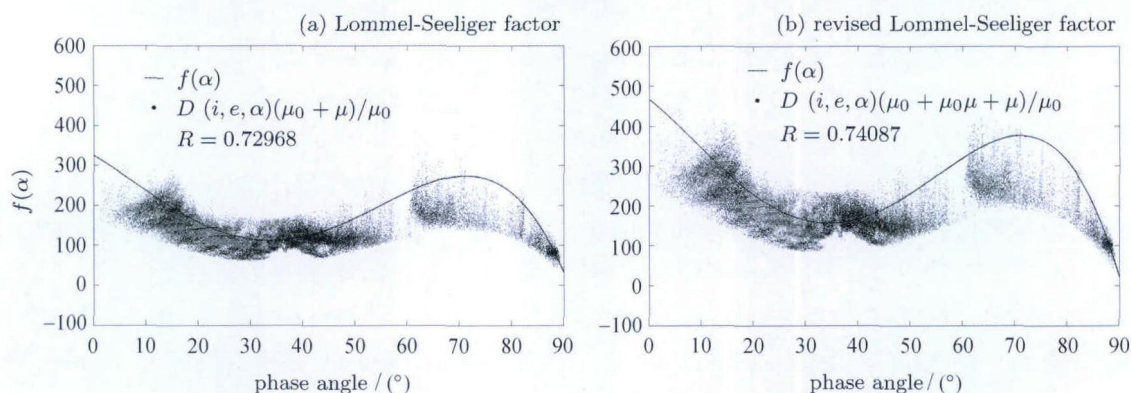


图 2 相函数拟合曲线与去除太阳入射角和传感器观测角影响后图像数据散点结果 (前视)

Fig. 2 Plot showing the fit between the phase function and the data (forward view)

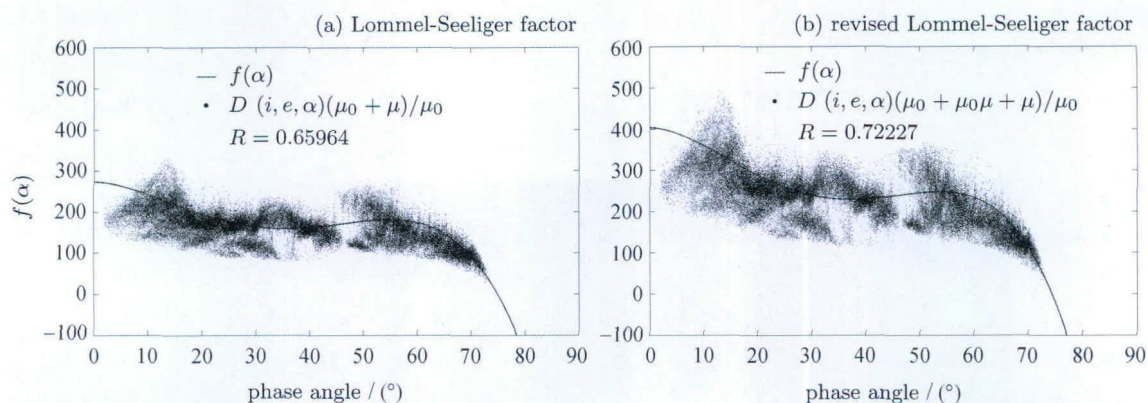


图 3 相函数拟合曲线与去除太阳入射角和传感器观测角影响后图像数据散点结果 (正视)

Fig. 3 Plot showing the fit between the phase function and the data (nadir view)

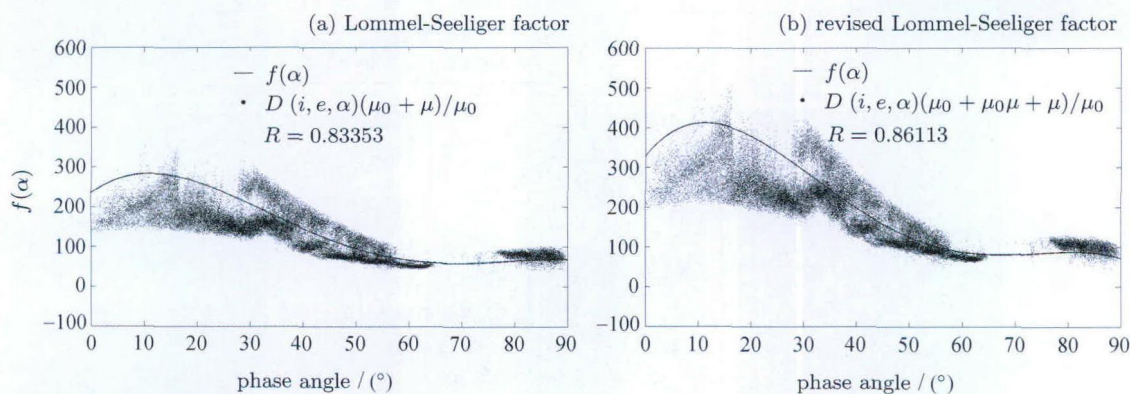


图 4 相函数拟合曲线与去除太阳入射角和传感器观测角影响后图像数据散点结果 (后视)

Fig. 4 Plot showing the fit between the phase function and the data (backward view)

Lommel-Seeliger 因子或修订后 Lommel-Seeliger 因子控制) 的 Chang'E-1 CCD 立体相机数据散点图。

通过图 2~4 可以清楚看出, 无论是使用 Lommel-Seeliger 因子还是修订后的 Lommel-Seeliger 因子, 拟合的相函数均能较好地反映去除太阳入射角和传感器观测角影响后 Chang'E-1 CCD 立体相机数据随相位角的变化趋势。但是, 使用修订后 Lommel-Seeliger 因子得到的相函数与去除太阳入射角和传感器观测角影响后数据的相关系数 (前视 $R = 0.74087$, 正视 $R = 0.72227$, 后视 $R = 0.86113$) 要高于使用 Lommel-Seeliger 因子得到的相关系数 (前视 $R = 0.72968$, 正视 $R = 0.65964$, 后视 $R = 0.83353$)。

这说明使用修订后 Lommel-Seeliger 因子可有效去除太阳入射角和传感器观测角对 Chang'E-1 CCD 立体相机数据的影响, 有利于相函数系数的精确拟合, 得到较为准确的光度校正结果, 便于反射率计算等后续研究的开展。

2.3 光度校正结果

在较为精确地拟合了相函数系数的基础上, 利

用改进的 Lommel-Seeliger 模型对 Chang'E-1 CCD 立体相机数据进行逐像素光度校正。分别选择同一轨道不同纬度 (60°N , 0° , 30°S) 和同一区域不同视角 (前视、正视和后视) 两组数据进行实验, 对比使用 Lommel-Seeliger 因子和修订后 Lommel-Seeliger 因子得到的光度校正结果, 分析验证本文方法的有效性和适用性。

(1) 同一轨道不同纬度数据

图 5 为同一轨道不同纬度光度校正前的正视数据, 其中图 5(a) 为 60°N 附近数据, 图 5(b) 为 0° 附近数据, 图 5(c) 为 30°S 附近数据。图 6 和图 7 分别为使用 Lommel-Seeliger 因子和修订后 Lommel-Seeliger 因子的光度校正结果。

从图 5 可以发现, 由于成像过程中几何观测条件的变化, 导致同一轨道不同纬度数据间的明暗程度差异很大。光度校正后 (见图 6 和图 7), 这种明暗差异显著减小, Chang'E-1 CCD 立体相机数据被校正到标准视几何条件下, 有效消除了几何观测条件变化引起的不同目标间光谱特性的不一致性。特别是对于较

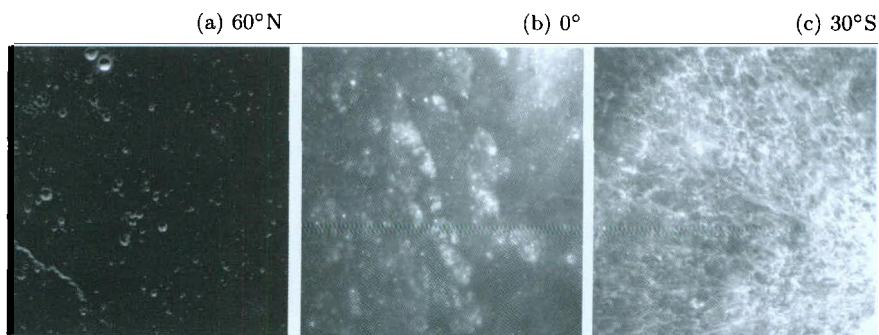


图 5 不同纬度地区光度校正前的数据

Fig. 5 Data before photometric correction

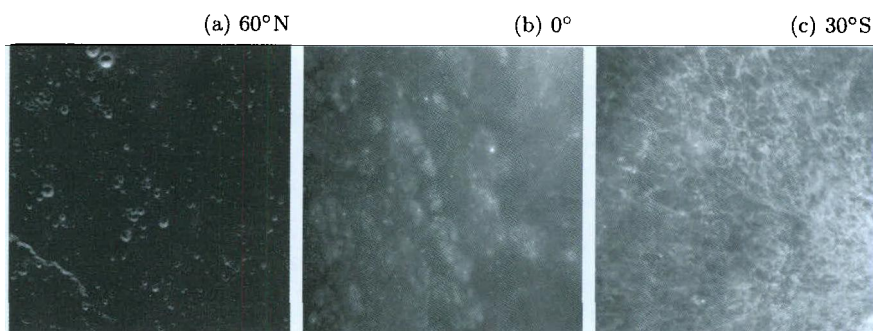


图 6 使用 Lommel-Seeliger 因子光度校正后的数据

Fig. 6 Data after photometric correction by Lommel-Seeliger factor

亮和较暗区域的光度校正, 修订后 Lommel-Seeliger 因子具有显著优势, 更加有利于进行月表不同纬度数据之间的对比和定量分析.

(2) 同一区域不同视角数据

图 8 为同一区域不同视角的光度校正前数据, 其中图 8(a) 为前视数据, 图 8(b) 为正视数据, 图 8(c) 为后视数据. 图 9 和图 10 分别为使用 Lommel-Seeliger 因子和修订后 Lommel-Seeliger 因子的光度校正结果. 从图 8 可以看出, 由于几何观测条件的不同, 同一区域不同视角数据的光谱特性差异比较明显, 无法

进行比较和定量分析. 光度校正后 (见图 9 和图 10), 同一区域不同视角数据的光谱特性较为一致, 明暗差异显著减小.

相关系数可以用来表征两幅图像之间光谱特性的接近程度, 相关系数越大, 说明不同视角数据的光谱特性越接近, 光度校正效果越好; 均方差可用来评价两幅图像之间的相似性, 均方差越小, 说明不同视角数据之间的光谱差异越小. 本文综合利用相关系数和均方差对同一区域不同视角数据的光度校正结果进行定量评价. 结果列于表 1.

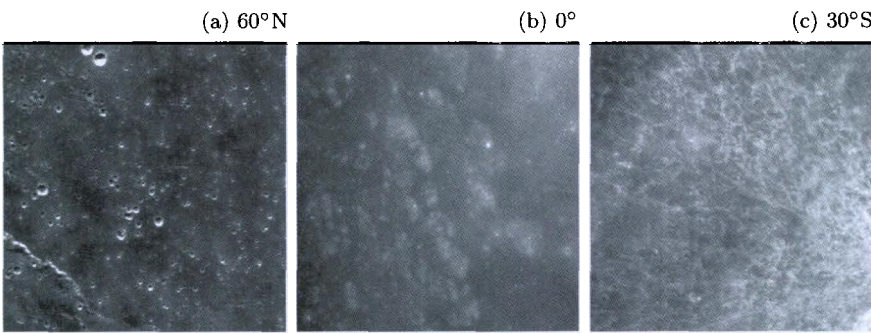


图 7 使用修订后 Lommel-Seeliger 因子光度校正后的数据
Fig. 7 Data after photometric correction by revised Lommel-Seeliger factor

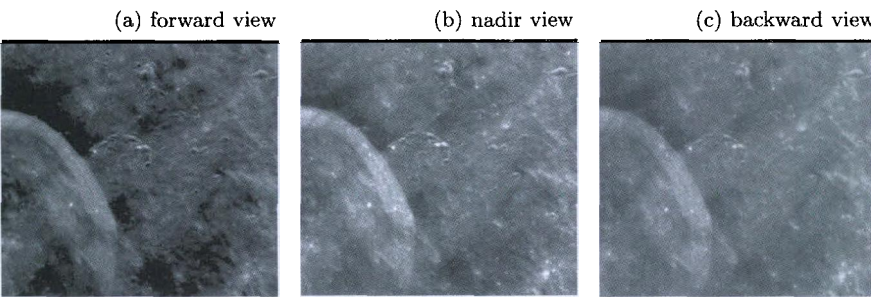


图 8 同一区域不同视角光度校正前的数据
Fig. 8 Data before photometric correction

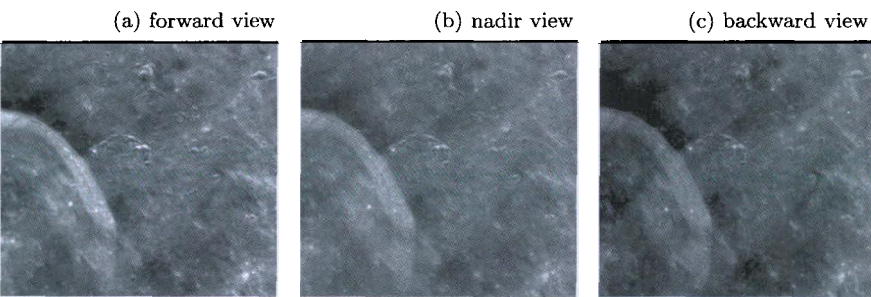


图 9 使用 Lommel-Seeliger 因子光度校正后的数据
Fig. 9 Data after photometric correction by Lommel-Seeliger factor

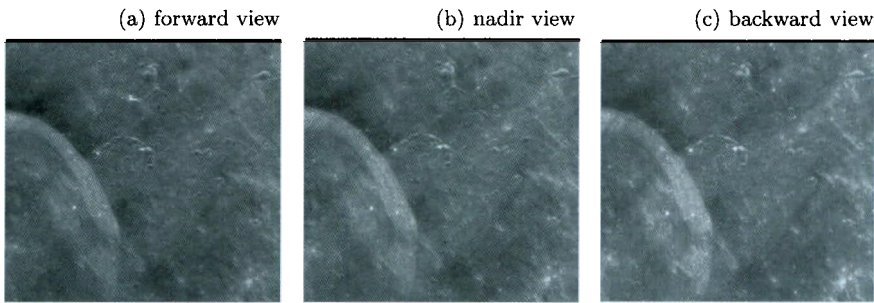


图 10 使用修订后 Lommel-Seeliger 因子光度校正后的数据
Fig. 10 Data after photometric correction by revised Lommel-Seeliger factor

表 1 同一区域不同视角数据光度校正前后定量分析
Table 1 Quantitative analysis before and after photometry correction

	相关系数				均方差			
	前视-正视	前视-后视	正视-后视	均值	前视-正视	前视-后视	正视-后视	均值
光度校正前	0.8756	0.7773	0.8657	0.8395	5.6330	2.5397	9.1939	5.7889
传统方法	0.8867	0.7974	0.8688	0.8510	0.2805	1.4883	2.2246	1.3311
本文方法	0.9027	0.8103	0.8850	0.8660	0.4643	0.1605	0.9422	0.5223

由表 1 可以明显看出, 在相关系数方面, 无论是使用 Lommel-Seeliger 因子还是修订后的 Lommel-Seeliger 因子, 不同视角光度校正结果间的相关系数均高于光度校正前, 一定程度上达到了光度校正的目的, 但是, 无论是三个视角数据两两之间的相关系数, 还是相关系数的均值, 本文方法均优于传统方法; 在均方差方面, 使用修订后 Lommel-Seeliger 因子的均方差远远小于使用 Lommel-Seeliger 因子和光度校正前, 本文方法得到的同一区域不同视角数据之间的光谱特性差异最小. 综上可知, 对于同一区域不同视角数据而言, 修订后 Lommel-Seeliger 因子是行之有效的, 能够较好地抑制几何观测条件变化引起的光谱差异, 将同一区域不同视角的数据最大程度地归一化到标准视几何条件下.

3 结论

从 Chang'E-1 CCD 立体相机数据出发, 利用修订后 Lommel-Seeliger 因子去除太阳入射角和传感器观测角对原始数据的影响, 使其能更好地契合相位角的变化, 以更为精确地拟合相函数系数, 得到更为准

确的光度校正结果.

- (1) 在相位角 $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ 范围内, 使用修订后 Lommel-Seeliger 因子拟合得到的相函数与去除太阳入射角和传感器观测角影响后的 Chang'E-1 CCD 立体相机数据具有较高的相关性, 较为准确地反映了 Chang'E-1 CCD 立体相机数据随传感器几何观测条件的变化规律.
- (2) 对于同一轨道不同纬度数据来说, 本文方法能够将 Chang'E-1 CCD 立体相机数据校正到标准视几何条件下, 明显消除了不同目标间光谱特性的不一致性, 特别是对较亮和较暗区域数据的光度校正效果更为有效.
- (3) 对于同一区域不同视角数据来说, 使用修订后 Lommel-Seeliger 因子能够显著减小它们之间的明暗差异, 使同一区域不同视角数据的光谱特性更为一致.

但是, 本文拟合的相函数系数并未考虑月表地形 (月海和高地) 的影响. 验证本文方法在不同地形条件下的光度校正效果; 考虑方位角的影响, 构建更为精确的月表 BRDF 模型; 针对不同地形条件发展更为有效的光度校正模型和方法有待进一步研究.

致谢 Chang'E-1 CCD 立体相机数据由中国科学院国家天文台提供。山东大学(威海分校)张江博士对本文提出了意见和建议。

参考文献

- [1] Li Chunlai, Liu Jianjun, Ren Xin, *et al.* The global image of the moon by the Chang'E-1: Data processing and lunar cartography [J]. *Sci. China: Earth Sci.*, 2010, **40**(3):294-306. In Chinese (李春来, 刘建军, 任鑫, 等. 嫦娥一号图像数据处理与全月球影像制图 [J]. 中国科学: 地球科学, 2010, **40**(3):294-306)
- [2] Wang Jie, Zeng Zuoxun, Yue Zongyu, *et al.* Research of lunar tectonic features: Primary results from Chang'E-1 lunar CCD image [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(4):482-491. In Chinese (王杰, 曾佐勋, 岳宗玉, 等. 月球主要构造特征: 嫦娥一号月球影像初步研究 [J]. 空间科学学报, 2011, **31**(4):482-491)
- [3] Zou Xiaoduan, Liu Jianjun, Li Chunlai. Applications of the visualization of lunar surface based on Chang'E-1 observations [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(1):100-105. In Chinese (邹小端, 刘建军, 李春来. 基于嫦娥一号观测数据的月表形貌可视化技术 [J]. 空间科学学报, 2011, **31**(1):100-105)
- [4] Zhao Baochang, Yang Jianfeng, Wen Desheng, *et al.* Design and on-orbit measurement of Chang'E-1 satellite CCD stereo camera [J]. *Spacecr. Eng.*, 2009, **18**(1):30-36. In Chinese (赵葆常, 杨建峰, 汶德胜, 等. 嫦娥一号卫星 CCD 立体相机的设计与在轨运行 [J]. 航天器工程, 2009, **18**(1):30-36)
- [5] Tian Hui. The Research to Modeling and Processing of Stereo Satellite Image Based on Chang'E-1 [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011. In Chinese (田辉. 基于嫦娥一号卫星 CCD 立体影像处理模型与方法的研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2011)
- [6] Zhao Yingshi. The Principle and Method of Analysis of Remote Sensing Application [M]. Beijing: Science Press, 2003. In Chinese (赵英时. 遥感应用分析原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003)
- [7] Chen Chao, Qin Qiming, Zhang Ning, *et al.* Research on photometric calibration and reflectance calculation of CE-1 IIS Data [J]. *Spectr. Spectral Anal.*, 2011, **31**(7):1985-1990. In Chinese (陈超, 秦其明, 张宁, 等. CE-1 干涉成像光谱仪数据光度校正与反射率计算 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, **31**(7):1985-1990)
- [8] Hillier J K, Buratti B J, Hill K. Multispectral photometry of the moon and absolute calibration of the Clementine UV/Vis camera [J]. *Int. J. Solar Syst. Stud.*, 1999, **141**(2):205-225
- [9] Soderblom J M, Bell J F, Hubbard M Y H, *et al.* Martian phase function: Modeling the visible to near-infrared surface photometric function using HST-WFPC2 data [J]. *Int. J. Solar Syst. Stud.*, 2006, **184**(2):401-423
- [10] Hapke B W. Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy [M]. New York: Cambridge University Press, 1993
- [11] Hapke B W. A theoretical photometric function for the lunar surface [J]. *J. Geophys. Res.*, 1963, **68**(15):4571-4586
- [12] McEwen A S. A precise lunar photometric function [J]. *Lunar Planet. Sci.*, 1996, **27**:841-842
- [13] McEwen A S, Robinson M S, Eliason E M, *et al.* Clementine observations of the Aristarchus region of the Moon [J]. *Science*, 1994, **266**(5192): 1858-1862
- [14] Pieters C M. The moon as a spectral calibration standard enabled by lunar samples: The Clementine examples [C]//Workshop on New View of Moon II: Understanding the Moon Through the Integration of Diverse Datasets. Texas, Houston: Lunar and Planetary Institute, 1999. 8025-8026
- [15] Wang Jingran, Chen Shengbo, Cui Tengfei. Mosaic of lunar image from CCD stereo camera onboard Chang'E-1 orbiter [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2010, **30**(6):584-588. In Chinese (王景然, 陈圣波, 崔腾飞. 嫦娥一号卫星 CCD 立体相机月表图像镶嵌 [J]. 空间科学学报, 2010, **30**(6):584-588)