



论文

嫦娥一号 IIM 数据定标的改进方法

胡森, 林杨挺*

中国科学院地质与地球物理研究所地球深部研究重点实验室, 北京 100029

*联系人, E-mail: linyt@mail.igcas.ac.cn

收稿日期: 2010-12-17; 接受日期: 2011-04-30

中国科学院知识创新重要方向性项目(编号: KZCX2-YW-Q08-1)、国家高技术研究发展计划(编号: 2009AA122201)和绕月探测工程科学数据应用与研究重点项目基金资助

摘要 嫦娥一号月球探测卫星的 IIM 数据在应用之前, 必须进行反射率定标. 本文在反射率定标之前, 对原始 2C 级 IIM 数据进行了坏线和坏点修复, 以及条纹去除. 由于条纹去除后的 IIM 影像不存在平场效应, 有效地抑制了坏线、坏点和平场效应对反射率转换的影响, 获得较已有 IIM 数据定标更好的结果. 通过对比月球典型地区的 IIM 光谱与地基望远镜光谱, 计算得到两者之间的增益和漂移因子. 将上述增益和漂移因子应用到月球的其他区域, 包括 Apollo 16 和 14 登陆点, Mare Serenitatis 和 Copernicus 撞击坑等区域, 均得到理想的校正结果, 表明上述增益和漂移因子可有效地校正月表的光谱.

关键词 嫦娥一号, IIM, 反射率, 定标**PACS:** 21.10.Jx, 46.90.+s, 46.15.-x

自嫦娥探月一期工程结束至今, 围绕嫦娥一号获得的月球数据进行科学研究的工作正在全面展开, 并取得了一系列的科研成果^[1,2], 如全月球的高分辨率影像^[3], 高分辨率高程图^[4], 全月球的 U, Th 和 K 的分布图^[1,2], 月表的微波亮温反演^[5], 月球的 FeO 和 TiO₂ 含量分布^[6]. 矿物的光谱特征与其成分和结构存在对应关系, 因此, 干涉成像光谱仪(IIM)是月球等深空探测的重要有效载荷之一. 嫦娥一号绕月卫星搭载的干涉成像光谱仪共获得了 170 G 的 2C 级数据. 这些海量的数据蕴含了月表的矿物组成、粒度、以及矿物化学成分等信息, 是深入研究月球形成和演化历史不可或缺的重要内容.

从 IIM 光谱数据解译月表矿物的含量以及化学组成等信息, 首先需要对所有 IIM 光谱数据进行反射

率定标, 将辐亮度转换成反射率. 由于我国开展深空探测还处于起步阶段, 有关 IIM 光谱数据的反射率定标工作报道很少, 其中 Wu 等人^[7]的分析表明嫦娥一号的 IIM 数据可以反演月表的矿物成分和含量, Chen 等人^[8]对虹湾地区进行了 FeO 和 TiO₂ 的分布研究, Liu 等人^[9]基于 IIM 的光谱吸收特征来获取月表的 TiO₂ 含量, 以及月表 FeO 含量的分析^[6].

2C 级 IIM 数据虽然完成了一系列的预处理^[10], 但给出的是辐射亮度, 需要将其转换成反射率后, 才能用于矿物成分和含量的反演. 在所有的 IIM 数据应用中都必须先对 IIM 数据进行定标^[7,9,11], 因而这一过程对后续的深入研究影响至关重要. 2C 级 IIM 数据存在非常明显的行向响应不一致(即平场效应)^[12], 所以在以往的反射率定标过程中, 定标区域的列向像元

引用格式: 胡森, 林杨挺. 嫦娥一号 IIM 数据定标的改进方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 879-888

Hu S, Lin Y T. Modified calibration method of the chang'E-1 IIM images (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2011, 41: 879-888, doi: 10.1360/132010-1289

远多于行向像元(如 2225 轨的 69~73 列, 11151~11167 行), 尽量降低平场效应对反射率定标的影响. 从文献[12]对平场效应的校正结果可以看出, 918 nm 波段的平场效应在 85 列最低, 891 和 865 nm 波段的平场效应单调递减, 那么选择 69~73 列作为绝对定标区域势必会引入一定的定标风险. 本文主要针对 IIM 数据的定标问题, 对原来的定标方法进行了改进, 本文先对 2C 级 IIM 数据进行坏线、坏点修复、条纹去除, 之后再将其辐射亮度转换成反射率. 本文条纹去除后的 IIM 影像不存在平场效应, 有效地消除了坏线、坏点和平场效应对定标的影响.

1 IIM 数据说明

IIM 的成像原理与主要优势在文献[11]中有详细说明, 故本文不再赘述, 此处着重描述 IIM 的数据存储格式及相关内容.

本次工作使用的是 2C 级 IIM 数据, 这些数据已经完成了一系列校正并转换成辐射亮度. 2C 级 IIM 数据以 PDS 格式存储, 头文件和影像数据均存储在同一文件. 头文件定义数据的存储格式、大小、经纬度等必要的信息, 是读取影像数据和进行几何校正的基础. 每一个 IIM 文件的列数(经度)是固定的, 均为 128 个像元, 空间分辨率为 200 m, 每幅影像的空间跨度约 25.6 km; 行(纬度)向跨度比较大, 从北纬 70°至南纬 70°均有覆盖, 每幅影像的纬度覆盖略有差异.

2 IIM 数据处理流程

以往处理 2C 级 IIM 数据的流程为: 先将 IIM 辐射亮度转换成反射率, 再修复坏线和坏点, 去除条纹, 进行平场校正、几何校正和反射率交叉定标, 最终得到校正后的反射率数据^[7,11]. 从该处理流程可以看出, 坏线修复、坏点修复、条纹去除等步骤在辐射亮度转换成反射率之后. 由于存在坏线, 所以在选择绝对定标区域的时候, 需要避开坏线, 以免引入误差. 另外, 以往 2C 级 IIM 数据的处理结果表明, 由于条纹去除后 IIM 影像行向响应的不均一性(平场效应)非常明显, 所以在条纹去除后, 还需要对平场效应进行校正^[7,11]. 平场效应的存在, 必然会影响反射率定标区域的像元值, 最终会影响反射率转换的精度. 以往选定的反射率定标区域为第 2225 轨 IIM 影像的 11151~11167

行、69~73 列所覆盖的范围^[7]. 上述定标区域落在平场校正曲线最小值的左侧^[7], 最终会导致影像转换成反射率后数值偏低.

所以本文在 IIM 数据处理流程上进行一些调整: 先修复坏线和坏点, 之后去除条纹, 再转换成反射率, 并对反射率进行交叉定标, 最后获得反射率数据. 该处理流程不仅获得了好结果, 同时也可以省略平场效应校正的处理步骤.

3 坏线、坏点修复及条纹去除

有关 IIM 数据中坏线和坏点的处理方式参考前人的方法, 详细内容可参考相关文献[7, 11].

在修复坏线过程中, 本次工作发现, 计算像元灰度斜率的公式中有一项除数, 导致计算行向相邻像元值的差可能为 0, 产生被 0 除的情况, 故本次工作把像元灰度斜率(S)的公式修改为

$$S_{i,j,k} = \frac{(DN_{i-1,j,k} + DN_{i+1,j,k} - 2 \times DN_{i,j,k})}{|DN_{i-1,j,k} - DN_{i+1,j,k}| + \Delta}, \quad (1)$$

其中 DN 为像元值, i, j, k 分别代表影像的列号、行号和波段号. 当 $|DN_{i-1,j,k} - DN_{i+1,j,k}|$ 不等于 0 时, Δ 赋值为 0; 当 $|DN_{i-1,j,k} - DN_{i+1,j,k}|$ 等于 0 时, Δ 赋值为 0.00001 进行像元灰度斜率计算.

去除条纹时采用“全局去条纹”方法^[13]. 设传感器的增益为 $a_{i,k}$, 偏移量为 $b_{i,k}$, 则图像中第 k 波段的 i 列、 j 行的辐射值 $I_{i,j,k}$ 应修正为

$$I'_{i,j,k} = a_{i,k} \times I_{i,j,k} + b_{i,k}, \quad (2)$$

其中 $I_{i,j,k}$ 为像素原始反射率, $I'_{i,j,k}$ 为修正值, $a_{i,k} = d_{all} / d_{i,k}$, $b_{i,k} = m_{all} - m_{i,k} \times d_{all} / d_{i,k}$, 式中 d_{all} 和 $d_{i,k}$ 分别是某波段整个图像以及像元所在列的反射率标准差, m_{all} 和 $m_{i,k}$ 分别是某波段整个图像以及像元所在列的反射率的平均值. 从“全局去条纹”的原理可以看出, 每列的增益和偏移量表明传感器在每列的响应不均一, 即存在平场效应, 那么去除条纹后可以校正影像行向响应不均一的差异.

以 2225 轨影像为例, 坏线修复前后的图像如图 1(a)和(b)所示, 坏线修复后的影像修复了像元异常多的列. 坏点修复后的影像如图 1(c)所示, 消除了原图像孤零异常的像元, 降低了图像的标准偏差, 该步骤是做好条纹去除的必要保证. 条纹去除后的影像如图 1(d)所示, 对比图 1(a)~(d)的多波段(RGB, R 为 918

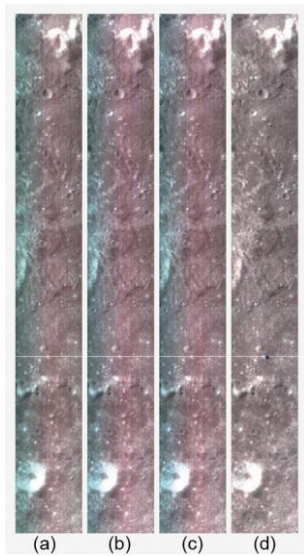


图 1 原始 2225 轨(a)、坏线修复(b)、坏点修复(c)以及条纹去除后(d)的 RGB(R: 918 nm, G: 757 nm, B: 658 nm)彩色合成影像

(a)~(c)中均可见明显的色调不均匀, 左侧偏蓝, 中央呈深红, 而右侧呈暗红, 表明从左到右的响应不一致. (d)是条纹去除后的 RGB 合成影像, 色调均匀, 表明消除了平场效应. (d)中蓝色方框所示范围为定标区域. (a)~(d)中白色横线为图 2 的切面位置

Figure 1 Composite image of 918 nm (R), 757 nm (G) and 658 nm (B) of Orbit 2225. (a) is the image of metadata, (b) is the image after bad line recovery, (c) is the image after bad points recovery, (d) is the image after removing stripes. (a)~(c) suggest the images showing gradient color trend, with blue-green in color on the left side, deep red on the center, and light red on the right side. (d) shows homogeneous color trend, indicating the flat field was removed. The blue rectangular in figure 1d is the calibration site. The white solid line on 1(a)~1(d) is the location of horizontal profile in Figure 2.

nm, G 为 757 nm, B 为 658 nm)彩色合成影像容易发现, 条纹去除后的影像消除了行向响应不均一的现象, 如原始图像(图 1(a))、坏线修复后的图像(图 1(b))和坏点修复后的图像(图 1(c))的 RGB 影像左侧偏蓝, 中央呈深红, 右侧稍微暗红, 而条纹去除后的影像(图 1(d))色调均匀.

条纹去除后, 影像的行向响应比较均一, 与以往的处理结果存在较大差异^[7,11]. 以 2225 轨影像的 11160 行向切面为例, 图 2(a)~(d)分别为原始、坏线修复、坏点修复和条纹去除后的影像切面图. 图 2 中 3 条曲线分别为图 1 中彩色影像的合成波段(R 为 918 nm, G 为 757 nm, B 为 658 nm). 原始影像(图 2(a))、坏线修复后的影像(图 2(b))和坏点修复后的影像(图 2(c))像元在左侧最低, 往右呈升高趋势, 在 60 列附

近达到较高值后, 像元值呈水平波动, 至最后数列稍有下降. 与 757 和 658 nm 波段相比, 918 nm 波段的行向变化最明显(图 2(a)~(c)). 与原始影像(图 2(a))、坏线修复(图 2(b))和坏点修复(图 2(c))影像的三波段切面图相比, 条纹去除后的切面图(图 2d)从左至右没有明显的辐亮度单调递增或递减的变化趋势, 仅在水平方向波动. 从三波段切面图说明条纹去除过程可以消除各波段的平场效应, 这也是图 1(d)中影像色调均匀的原因.

4 反射率转换

由于本文先修复了坏线和坏点, 并采用“全局条纹去除法”^[13]消除了影像异常的明亮变化和平场效应(图 1 和 2). 最终本文结合以往对嫦娥一号 IIM 数据的校正方法^[11]和月亮女神 MI 数据的校正方法^[14], 选取 2225 轨的 66~75 列、11157~11166 行的范围作为定标的区域, 如图 1(d)中蓝色方框所示区域. 该区域的反射率采用 Apollo 16 月壤(62231)的实验室双向反射率作为定标的光谱(图 3(a)). 计算该区域的辐亮度如图 3(b). 与文献[7]的 IIM 定标方法相比, 除前两个波段外, 3~25 波段的辐亮度的平均值均低于文献[7], 26~32 波段的辐射亮度的平均值均高于文献[7], 表明平场效应对定标工作有一定的影响; 与文献[15]的定标方法相比, 较多波段的辐亮度有一些差异, 可能与选择不同的定标区域有关. 从前人两种定标方法相比, 本文定标场辐亮度的标准偏差最小(图 3(b)).

5 反射率交叉校正

5.1 交叉定标区域选择

地基望远镜对月球的典型撞击坑、高地、月海等区域进行了光谱观测, 获得了月球局部的望远镜光谱, 这些光谱是月表 IIM 数据的良好参考, 可以显而易见地评估反射率转换的好坏. 本次工作使用的望远镜数据均从布朗大学 Relab 实验室的数据库中下载(<http://www.planetary.brown.edu/relab/>). 参考 Lucey (http://astrogeology.usgs.gov/Projects/ClementineNIR/files/Comparison_clem_usgs_Lucey.pdf)对 Clementine 数据的校正方法, 本文工作主要选取 Aristarchus 撞击坑的高地、撞击坑中央隆起、撞击坑西南壁和撞击坑南侧底部作为反射率交叉定标的区域. Aristarchus

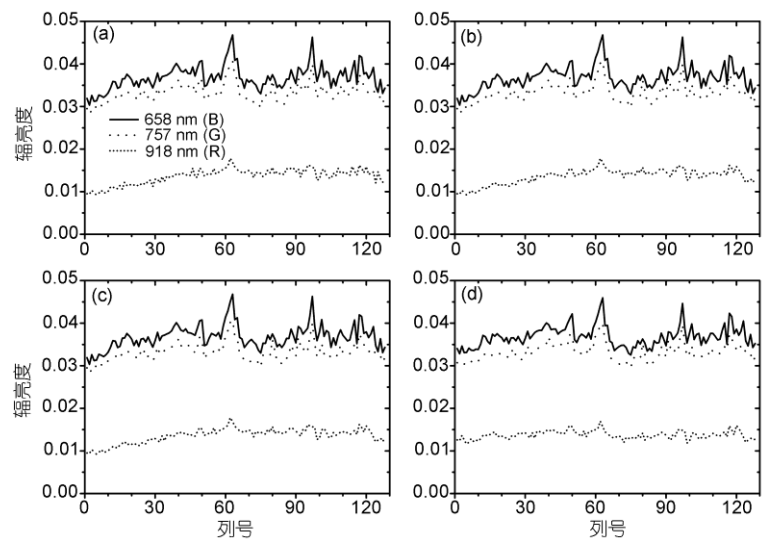


图 2 2225 轨 IIM 原始(a)、坏线修复(b)、坏点修复(c)和条纹去除后(d)的 11160 行切面图

(a)~(c)中可见 918 nm, 757 nm 和 658 nm 波段均有明显的平场效应, 像元值(DN)从左侧往右呈现递增趋势, 918 nm 波段最明显。从条纹去除后的 11160 行切面(d), 可见, 条纹去除过程有效地消除了行向响应不一致的现象, 918 nm, 757 nm 和 658 nm 从左至右的辐亮度值切面表现平坦
Figure 2 Horizontal profiles (white solid line in Figure 1) of Orbit 2225 at 658 nm, 757 nm and 918 nm in line 11160. (a) is the profile of metadata, (b) is the profile after bad line recovery, (c) is the profile after bad point recovery, (d) is the profile after removing stripes. (a)~(c) show positively increase of albedo from left to right at 918 nm, 757 nm, and 618 nm, respectively, indicative of the existence of flat field. The profile after removing stripes shows flat fluctuation of albedo across the section at 918 nm, 757 nm, and 658 nm, respectively.

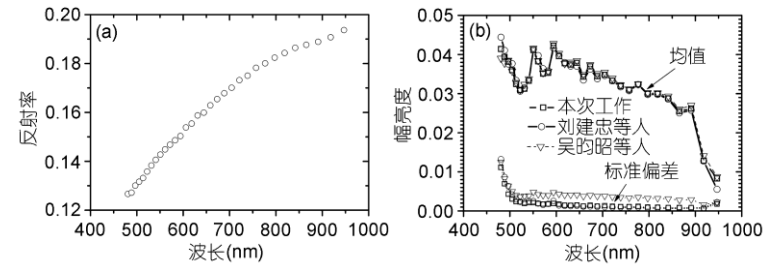


图 3 Apollo 16 的实验室双向反射率光谱(a)和本次工作定标区域的辐亮度统计图与刘等人^[15]和 Wu 等人工作的比较(b)
Figure 3 The bidirectional reflectance of Apollo 16 lunar soil (a) and the albedo statistical results of this study compared with those used by Liu et al. [15] and Wu et al. (b).

表 1 六个交叉定标区域的影像位置和相对应的望远镜光谱

Table 1 The location of 6 sites chosen for spectral cross correction and their telescopic spectra					
位置	望远镜光谱	IIM 轨道号	列号	行号	像元
Aristarchus 撞击坑中央峰(CP)	HA1034	2898	80~99	7590~7609	20×20
Aristarchus 撞击坑西南壁(SW)	HA0973	2898	28~47	7639~7658	20×20
Aristarchus 撞击坑南侧底部(SF)	HA0993	2898	90~109	7615~7634	20×20
Aristarchus 高地 1(P1)	HA0979	2902	1~8	7014~7036	8×23
Aristarchus 高地 2(P2)	HA0130	2902	33~52	6946~6965	20×20
Aristarchus 高地 3(P3)	HA1032	2899	33~52	6974~6993	20×20

撞击坑中央隆起位于 2898 轨 IIM 影像中, 对应 80~99 列、7590~7609 行范围, 共 400(20×20)个像素点, 空间跨度约 4×4 km², 略小于望远镜空间覆盖的 5×5 km², Aristarchus 撞击坑中央隆起的望远镜数据选择

HA1034(图 4); 同理, 可确定其他五个区域对应的位置和望远镜数据, 具体参数详述于表 1。在像元选择上, 由于 2902 轨影像没有完全覆盖 Aristarchus 高地 1, 所以仅选择了 184(8×23)个像元进行计算。

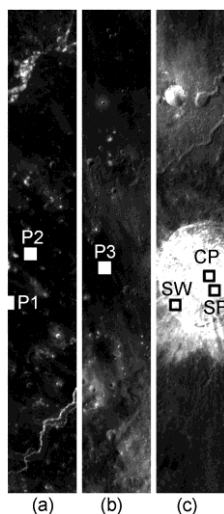


图 4 六个反射率交叉定标区域的位置示意图

Aristarchus 撞击坑中央隆起(CP)、南侧底部(SF)、西南壁(SW)和 3 个高地(P1, P2 和 P3)

Figure 4 The location of 6 sites chosen for cross correction around Aristarchus crater. There are Aristarchus crater central peak (CP), Aristarchus crater south floor (SF), Aristarchus crater southwest wall (SW), and 3 plateaus (P1, P2, and P3), respectively.

5.2 交叉定标结果

在选定的交叉定标区域, 将 IIM 数据和望远镜数据在 757 nm 处归一化(图 5). 利用迭代算法计算 $(IIM_{\lambda} \times \text{gain} + \text{offset}) / IIM_{757}$ 与 $\text{Telescopic}_{\lambda} / \text{Telescopic}_{757}$ 之间的增益(gain)和漂移因子(offset), 其中 λ 为波长. 计算得到的增益与漂移因子如图 6 所示, 详细参数列于表 2. 从增益的分布看(图 6), 短波段的反射率略有抑制, 长波段的增益几乎均为 1. 前两个波段和最后三个波段的漂移不为 0, 918 nm 处的漂移可达 0.006.

根据计算得到的增益和漂移因子对 IIM 反射率进行交叉校正, 获得交叉校正后的反射率曲线, 如图 5 所示. 从图 5 中可以发现, 反射率校正前后的光谱存在较大变化, 特别是光谱曲线两端差异最明显. 与撞击坑相比, Aristarchus 的 3 个高地(P1, P2 和 P3)在短波段的差异不明显, 而最后两个波段(891 nm 和 918 nm)的差异最大(图 5), 如这 3 个高地在 918 nm 处的相对反射率变化分别为 0.065, 0.068 和 0.059, 而撞击坑内 3 个交叉定标区域(SW, SF 和 CP)的相对反射率变化均小于 0.017(图 7). Aristarchus 撞击坑内的 3

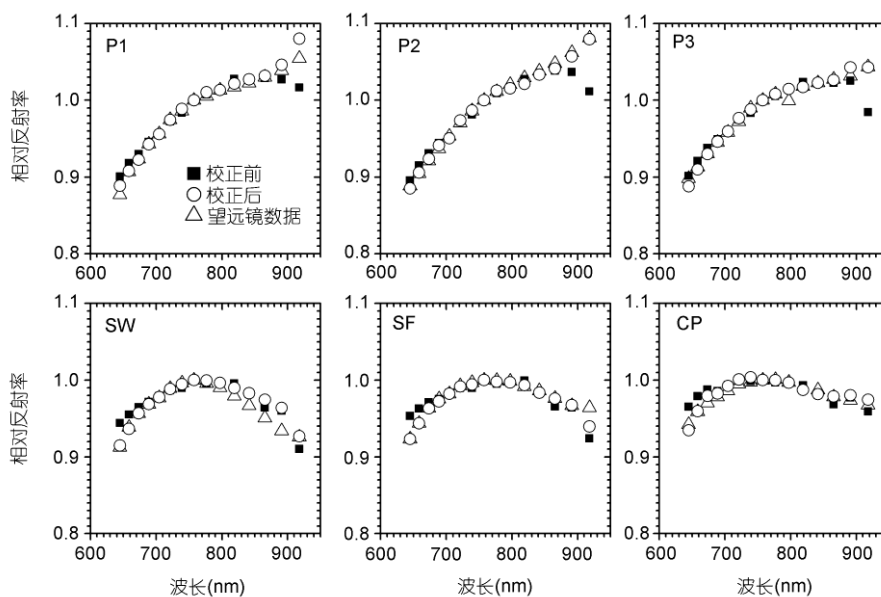


图 5 交叉校正前后的 IIM 光谱与望远镜光谱曲线

在 757 nm 处归一化. 经过交叉校正后, Aristarchus Plateau 2(P2)和 Plateau 3(P3)、撞击坑中央峰(CP)和撞击坑西南壁(SW)的 IIM 光谱与望远镜数据几乎完全一样; Aristarchus Plateau 1(P1)和撞击坑南侧底部(SF)在 918 nm 处的反射率校正效果不是特别理想

Figure 5 Spectra of IIM and telescopic data before and after cross correction, normalized at 757 nm. The spectra of IIM at Aristarchus plateau 2 (P2), plateau 3 (P3), crater central peak (CP) and crater southwest wall (SW) show well accordance with those acquired by telescope. The spectra of IIM at Aristarchus plateau 1 (P1) and crater south floor show a little difference with those acquired by telescope at 918 nm.

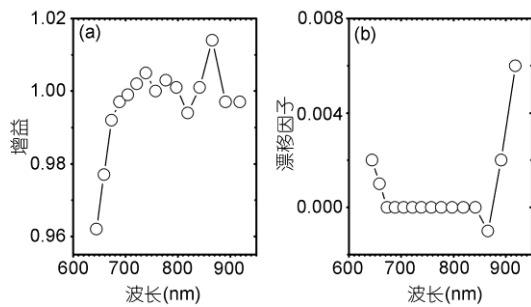


图 6 交叉定标的增益和漂移因子分布图

Figure 6 Gain and offset for recalibration of IIM data relative to telescopic spectra.

个定标区域(SW, SF 和 CP)的相对反射率在短波段略有降低, 在长波段略有升高(图 5). 从交叉定标前后的结果看, 交叉定标过程消除了高地的相对反射率在 891 和 918 nm 处突然降低的现象, 交叉校正后的光谱与典型的高地光谱(如 Apollo 16)比较接近(图 3).

表 2 嫦娥一号 IIM 光谱在不同波段的增益和漂移因子

Table 2 Gain and offset of the IIM spectra

波长(nm)	644.6	658.6	673.3	688.6	704.6	721.4	739.0	757.4	776.9	797.3	818.9	841.6	865.6	891.1	918.1
增益	0.962	0.977	0.992	0.997	0.999	1.002	1.005	1	1.003	1.001	0.994	1.001	1.014	0.997	0.997
漂移因子	0.002	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.001	0.002	0.006

图 7 是交叉定标前后的反射率曲线, 可以发现, 在交叉定标前, 高地的反射率在 891 和 918 nm 处突然降低, 指示该地区可能富含铁镁质矿物, 与该区域的矿物组成和成熟度都不相符. 经过交叉定标校正后, 高地的光谱在 891 和 918 nm 处反射率得到修正, 与典型的月表高地光谱(如 Apollo16)相似(图 3). 与高地(P1, P2 和 P3)相比, Aristarchus 撞击坑内的三个定标区域的反射率明显偏高(图 7). 比较交叉校正前后的光谱, Aristarchus 撞击坑内的相对反射率变化也小于高地的相对反射率变化(图 5 和 7). 从高地和撞击坑内的交叉定标结果看, 交叉定标主要消除了高地光谱长波段的反射率异常, 对撞击坑中富铁镁质区域的光谱特征不会有太大的影响.

5.3 交叉定标检验

为了检验本文计算的增益和漂移因子对月球其它区域的有效性, 我们选定 Apollo 16(A16), Mare

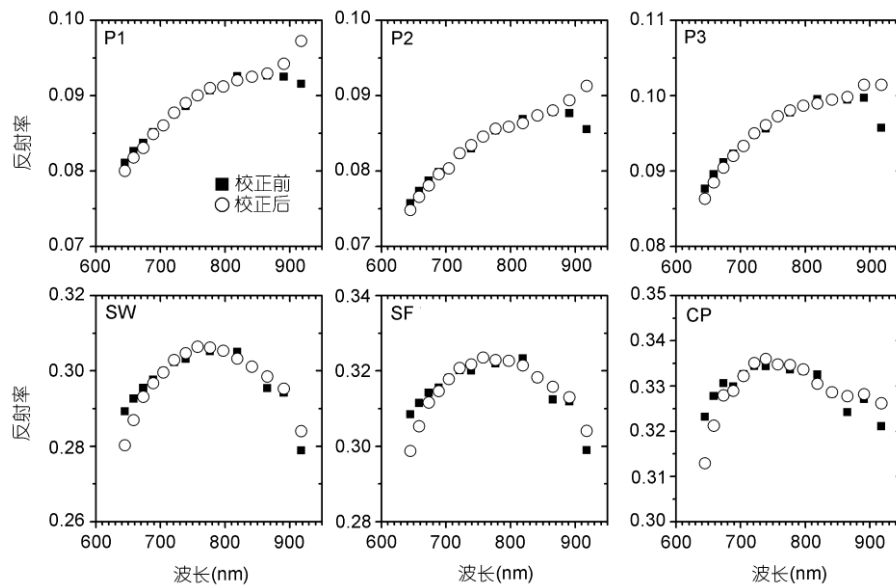


图 7 六个交叉校正区域在反射率交叉校正前后的绝对反射率曲线

P1, P2 和 P3 分别为 Aristarchus Plateau 1, 2 和 3; SW 为 Aristarchus 撞击坑西南壁; SF 为撞击坑南侧底部; CP 为撞击坑中央峰

Figure 7 Absolute reflectance of 6 sites chosen for cross correction. P1, P2, P3 are Aristarchus plateau 1, 2, 3, respectively. SW is Aristarchus crater southwest wall. SF is Aristarchus crater south floor. CP is Aritarchus crater central peak.

Serenitatis(MS2), Copernicus 撞击坑壁(CW)和 Apollo 14 (A14)作为检验交叉定标好坏的区域. 这四个区域涵盖了月球高地、月海和撞击坑, 代表了典型的月球地质单元. 图 8(a)为 Apollo 16(A16)在 2225 轨影像的位置, 选取绝对定标的 100(10×10)个像元, 对应的望远镜光谱选择 HA0028; 同理可确定与 Apollo 14 (A14), Mare Serenitatis (MS2)和 Copernicus 撞击坑壁(CW)望远镜光谱相对应的 IIM 光谱, 分别示意于图 8(b)~(d), 详细参数列于表 3. 图 9 为经过增益和漂移校正后的相对反射率. 为了方便比较, 将 IIM 数据与望远镜数据在 757 nm 处归一化. 从图 9 可见, 在反射率交叉校正前, 除 Apollo 16 外, 其他 3 个区域的 IIM 光谱在 891 和 918 nm 处均低于相对应的望远镜光谱; 在反射率交叉校正后, 高地(Apollo14)、月海(MS2)和撞击坑(Copernicus)的 IIM 光谱与望远镜光谱几乎没有差异, 表明反射率交叉校正的结果非常好. 交叉校正后, Apollo 16 (A16)在 918nm 处的反射率略高于

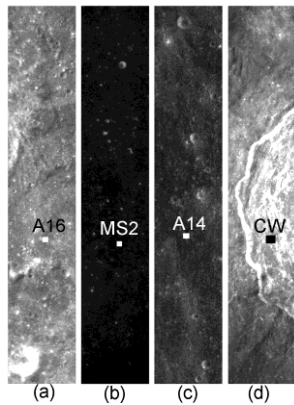


图 8 四个交叉校正检验区域的位置示意图

底图为各自的 757 nm 灰度影像, (a)为 Apollo 16(A16)在 2225 轨影像的位置; (b)为 Mare Serenitatis (MS2)在 2220 轨影像的位置; (c)为 Apollo 14 (A14)在 2871 轨影像的位置; (d)为 Copernicus 撞击坑壁(CW)在 2875 轨影像的位置

Figure 8 The location of 4 sites chosen for checking cross correction based on 757 nm images. There are Apollo 16 (a) on orbit 2225, Mare Serenitatis (b) on orbit 2220, Apollo 14 (c) on orbit 2871 and Copernicus crater wall (d) on orbit 2875.

表 3 四个交叉校正检验区域的影像位置和相对应的望远镜光谱

Table 3 The location of 4 sites chosen for checking cross correction and their telescopic spectra

位置	望远镜光谱	IIM 轨道号	列号	行号	像元
Apollo 16 (A16)	HC0028	2225	66~75	11157-11166	10×10
Mare Serenitatis (MS2)	HB0916	2220	68~76	6920-6929	9×10
Apollo 14 (A14)	HC0750	2871	55~65	11492-11501	11×10
Copernicus crater wall (CW)	HA0338	2875	72~88	9654-9668	17×15

望远镜的反射率. 从整体上看, 反射率交叉校正后的光谱质量得到改善.

图 10 为 4 个交叉校正检验区域的绝对反射率曲线. Mare Serenitatis (MS2)的反射率非常低, 在反射率交叉校正前, 其光谱特征表现出强烈的 1000 nm 吸收带, 指示该地区富含铁镁质硅酸盐, 与该地区的成熟度不符. 从绝对定标前后的光谱曲线看, 所有区域的反射率在短波段有所削弱, 在 891 和 918 nm 处得到加强.

从图 9 和 10 可以看出, 利用本文得到的增益和漂移因子对其他区域的反射率校正结果与望远镜光谱非常接近, 说明该方法适合全月球的光谱校正.

5.4 月球的反射率影像

通过上述方法可以对整个月球的光谱进行标定, 将辐亮度转换成反射率数据. 本节仅以 4 个典型的月表地质单元为例说明问题. 主要选择 Tycho 撞击坑、Copernicus 撞击坑、Mare Serenitatis、和 Apollo 14 作为样本进行讨论. 图 11 为上述 4 个区域的反射率 RGB 合成影像(R 为 658 nm, G 为 757 nm, B 为 918 nm). Tycho 撞击坑的反射率较高, 与其形成的年龄较小有关, 在撞击坑的中央峰、底部和侧壁有明显的 1000 nm 吸收峰(图 11(a)). Copernicus 撞击坑的反射率稍低于 Tycho 撞击坑, 在其撞击坑内部可见有玄武岩的吸收特征(图 11(b)). 月海和高地的反射率形成鲜明的对比, 如月海 Serenitatis 反射率低, 高地 Apollo 14 着陆区反射率高(图 11(c)和(d)). 从细节看, 月海 Serenitatis 附近可见大量的小撞击坑, 拥有 1000 nm 吸收峰, 相比高地 Apollo 14 着陆区在 1000 nm 处几乎没有吸收峰(图 11(c)和(d)).

6 结论

(i) 从 IIM 数据的改进定标结果看(图 1), 条纹去除过程消除了平场效应. 在条纹去除后进行反射率转

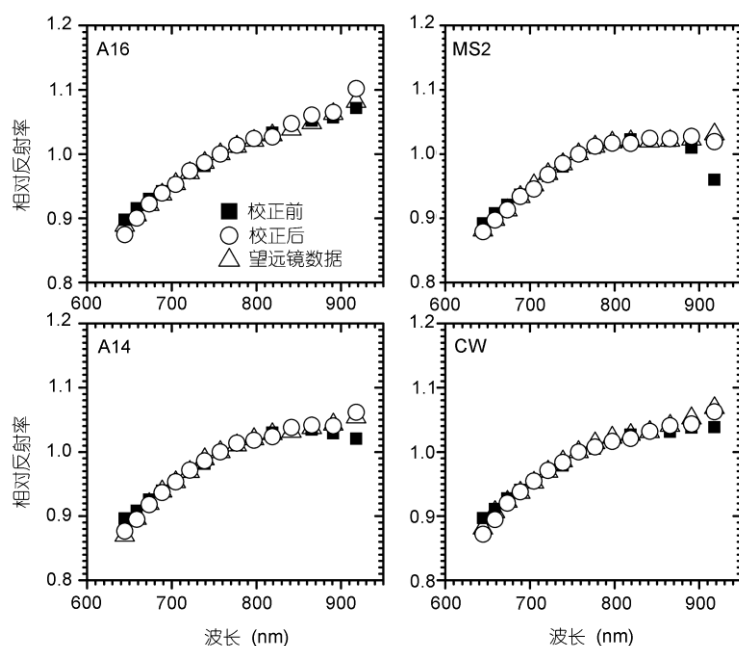


图 9 四个交叉校正检验区域的相对 IIM 反射光谱和望远镜光谱

A16 为 Apollo 16 绝对定标场的光谱, MS2 为 Mare Serenitatis 的光谱, A14 为 Apollo 14 的光谱, CW 为 Copernicus 撞击坑壁的光谱
Figure 9 Relative reflectance of 4 sites chosen for checking cross correction. There are Apollo 16 (A16), Mare Serenitatis (MS2), Apollo 14 (A14) and Copernicus crater wall (CW), respectively.

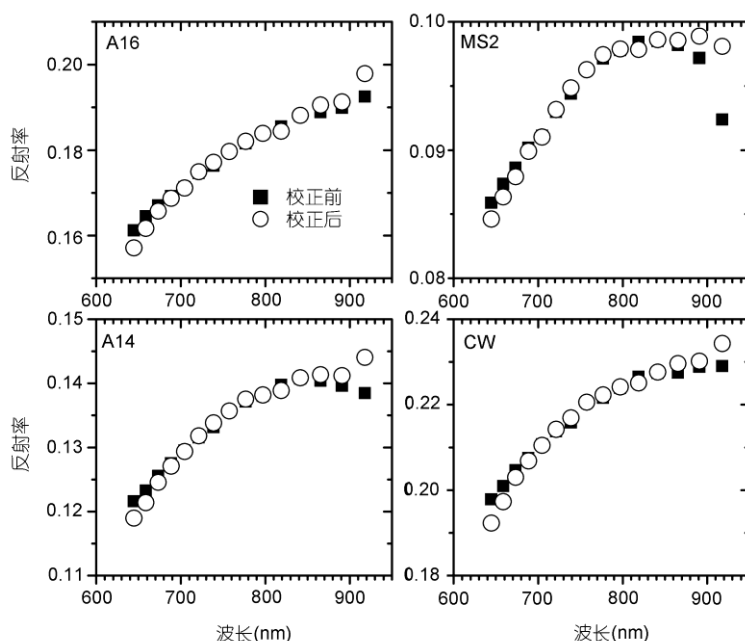


图 10 四个交叉校正检验区域在反射率交叉校正前后的 IIM 反射光谱

A16 为 Apollo 16 绝对定标场的光谱, MS2 为 Mare Serenitatis 的光谱, A14 为 Apollo 14 的光谱, CW 为 Copernicus 撞击坑壁的光谱
Figure 10 Absolute reflectance of 4 site chosen for checking cross correction. There are Apollo 16 (A16), Mare Serenitatis (MS2), Apollo 14 (A14) and Copernicus crater wall (CW), respectively.

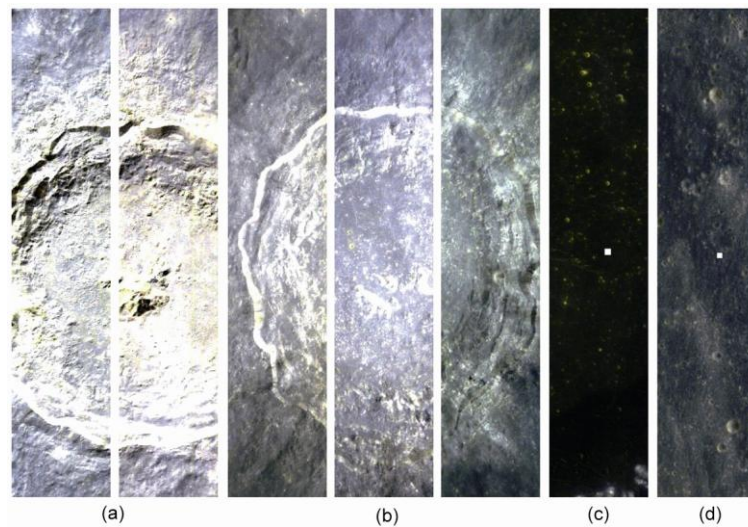


图 11 Tycho 撞击坑(a)、Copernicus 撞击坑(b)、Mare Serenitatis 月海(c)和 Apollo14 着陆点(d)的 RGB 合成影像图(R 为 658 nm, G 为 757 nm, B 为 918 nm)

Figure 11 Composite images of 918 nm (red), 757 nm (green) and 658 nm at Tycho crater (a), Copernicus crater (b), Mare Serenitatis (c) and Apollo 14 (d), respectively.

换避免了坏线、坏点和平场效应对反射率定标的影响。

(ii) Aristarchus 区域进行反射率交叉校正可以获得 IIM 反射率在近红外波段的增益和漂移因子。根据计算得到的增益和漂移因子对月球其他地质单元

的反射率进行交叉校正,校正后的光谱与望远镜光谱匹配很好(图 9 和 10),表明该校正因子可以有效地校正月球的反射率。

(iii) 交叉校正后的光谱有效地纠正了 891 nm 和 918 nm 波段的反射率异常(图 9 和 10),对于定量反演月表的 FeO 和 TiO_2 有重要影响。

致谢 本次工作使用的 2C 级 IIM 数据由中国科学院国家天文台月球与深空探测科学应用中心提供; IIM 数据的绝对定标方法得到南京大学吴昀昭老师的大力帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

- 1 Ouyang Z Y, Li C L, Zou Y L, et al. Chang'E-1 Lunar mission: An overview and primary science results. *Chin J Space Sci*, 2010, 30(5): 392–403
- 2 Ouyang Z Y, Li C L, Zou Y L, et al. Primary scientific results of Chang'E-1 lunar mission. *Sci China Earth Sci*, 2010, 53(11): 1565–1581
- 3 Li C L, Liu J J, Ren X, et al. The global image of the Moon obtained by the Chang'E-1: Data processing and lunar cartography. *Sci China Earth Sci*, 2010, 53(8): 1091–1102
- 4 Li C L, Ren X, Liu J J, et al. Laser altimetry data of Chang'E-1 and the global lunar DEM model. *Sci China Earth Sci*, 2010, 53(11): 1582–1593
- 5 Wang Z Z, Li Y, Zhang X H, et al. Calibration and brightness temperature algorithm of CE-1 Lunar Microwave Sounder (CELMS). *Sci China Earth Sci*, 2010, 53(9): 1392–1406
- 6 Ling Z C, Zhang J, Liu J Z, et al. Preliminary results of FeO mapping using imaging interferometer data from Chang'E-1. *Chin Sci Bull*, 2011, 56(4): 376–379
- 7 Wu Y Z, Xu X S, Xie Z D, et al. Absolute calibration of the Chang'E-1 IIM camera and its preliminary application. *Sci China Ser G-Phys Mech Astron*, 2009, 52(12): 1842–1848
- 8 Chen S B, Meng Z G, Cui T F, et al. Geologic investigation and mapping of the Sinus Iridum quadrangle from Clementine, SELENE, and Chang'e-1 data. *Sci China Phys Mech Astron*, 2010, 53(12): 2179–2187

- 9 Liu F J, Qiao L, Liu Z, et al. Estimation of lunar titanium content: Based on absorption features of Chang'E-1 interference imaging spectrometer (IIM). *Sci China Phys Mech Astron*, 2010, 53(12): 2136–2144
- 10 Zhang L Y, Li C L, Liu J Z, et al. Data processing of imaging interferometer of the Chang'E project. In: *Proceedings of the International Lunar Conference*. Toronto, Canada, American Astronautical Society, 2005
- 11 Wu Y Z, Zhen Y C, Zou Y L, et al. Global absorption center map of the mafic minerals on the Moon as viewed by CE-1 IIM data. *Sci China Phys Mech Astron*, 2010, 53(12): 2160–2171
- 12 Wu Y Z, Zou Y L, Zheng Y C, et al. A preliminary experience in the use of Chang'E-1 IIM data. *Planet Space Sci*, 2010, 58: 1922–1931
- 13 Tan B X, Li Z Y, Chen E X, et al. Preprocessing of EO-1 Hyperion hyperspectral data (in Chinese). *Remote Sensing Info*, 2005, 6: 36–41 [谭炳香, 李增元, 陈尔学, 等. EO-1 Hyperion 高光谱数据的预处理. *遥感信息*, 2005, 6: 36–41]
- 14 Ohtake M, Matsunaga T, Yokota Y, et al. Deriving the absolute reflectance of lunar surface using SELENE (Kaguya) multiband imager data. *Space Sci Rev*, 2010, 154: 57–77
- 15 刘建忠, 张文喜, 凌宗成, 等. 嫦娥一号干涉成像光谱数据光度校正与反射率换算. 绕月探测工程探测数据应用研究进展论文集. 北京: 中国科学院探月工程总体部. 2009, 200–204

Modified Calibration Method of the Chang'E-1 IIM Images

HU Sen & LIN YangTing^{*}

Key Laboratory of the Study of Earth Deep Interior, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

The Chang'E-1 IIM data must be calibrated before using to inverse the element abundance of the lunar surface. In this study, we have done an adjustment to the IIM data before converting into reflectance. First we recover the bad lines and bad points, then remove the stripes, and last convert the radiance into reflectance. This data processing procedure will remove the bad lines, bad points and flat field effect to influence the calibration results. After that, we make a cross correction between IIM data and ground telescopic spectra, and calculate the gain and offset between them. At last, we apply the gain and offset to correct the spectra of other lunar locations, including Apollo 16 and 14 landing points, Mare Serenitatis and Copernicus crater wall. The cross corrected IIM spectra seems equal with those acquired by ground telescope, indicating the effective of the cross correction to the other lunar locations.

Chang'E-1, IIM, reflectance, calibration

PACS: 21.10.Jx, 46.90.+s, 46.15.-x

doi: 10.1360/132010-1289