

嫦娥一号干涉成像光谱仪(IIM)2C级数据信息提取

王翔^{1,2*}, 陈建平^{1,2*}, 李剑锋^{1,2}, 史蕊^{1,2}, 伍墨^{1,2}

1. 中国地质大学, 北京 100083
2. 北京市国土资源信息开发研究重点实验室, 北京 100083

摘要 通过分析 Chang'E-1 卫星所获取的高光谱数据的太阳高度角因素, 选取了太阳高度角较高的 IIM 2C 数据进行光谱定标。采用邻域平均法及邻域加权均值法对原始数据进行了杂点、条带修复。由于干涉成像光谱仪 CCD 阵列增益畸变以及它的自身问题使得干涉影像存在横向响应不均一性, 提出采用基于子空间最大特征值法进行校正, 结果影像亮度统计其强度表现均一, 符合自然图像特征, 并采用自编程序进行几何校正。运用国际上较为成熟的经验线性法对 Chang'E-1 IIM 2C 数据进行绝对定标; 与此同时, 为了修正线性定标的偏置系数及降低数据噪声, 首次采用自适应小波变换法对辐射定标后数据进行后处理, 确定了 IIM 2C 数据可用波段。通过对比国际标准定标点数据, 制订了嫦娥 IIM2C 数据分析方案, 完成了第一幅完整的 Chang'E-1 IIM 2C 月球正面反射率影像。

关键词 嫦娥一号; 干涉成像光谱仪; 阵列增益畸变; 绝对定标; 小波变换

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)04-1145-06

引言

进入 21 世纪以来, 探月工程飞速发展; 欧洲航天局 (ESA), 中国航天局 (CNSA)、日本航天局 (JASA), 印度太空研究组织 (ISRO), 美国宇航局 (NASA) 分别向月球发射了探月卫星。2010 年欧阳自远等初次探索研究了“嫦娥一号”探月卫星所获取的数据, 并取得到了丰硕的科学成果, 为进一步研究认识月球打下重要基础^[1,2]。

由于太空环境、传感器自身、月表环境的差异, 导致所获得光谱数据不能真实反映月表特征。Pieters 等依据 Apollo 62231 样品, 在实验室对 Clementine 数据进行辐射定标^[3]; Pieters 等基于月表岩石矿物差异, 对八个不同月球定标点进行了总结分析, 制订了对月不同传感器优选辐射定标方案^[4]; 吴昉昭等对我国“嫦娥一号”进行了线性定标, 为数据下一步研究打下了基础^[5]。本文经 IDL 编译程序对 IIM 数据进行筛选, 自动条带、杂点剔除, 几何校正; 采用基于子空间最大特征值法进行均一校正, 使影像结果符合均一幅亮度; 完成了数据从辐亮度到反射率的绝对定标并首次提出自适应小波变换对定标结果降噪处理, 建立一套针对月球资源信息的遥感数据处理方法和信息提取的工作流程。

1 IIM 数据特征

与传统色散型成像光谱仪相比, 干涉型成像光谱仪具有能量利用率高、采样超连续、数据量低, 以及空间稳定性高, 光谱不受卫星姿态影响等优势。

“嫦娥一号”IIM 级 2c 数据基本特征为采用推扫模式, 工作波长范围为 0.48~0.96 nm, 共有 32 个谱段, 光谱分辨率为 325.5 cm^{-1} 。在卫星高度为 200 km 时, 地面分辨率为 $200 \text{ m} \cdot \text{pixel}^{-1}$, 成像幅宽为 25.6 km^[6]。可见, 在二维空间获取月表图像的同时, IIM 每个像位点都可获得一条连续光谱曲线, 具有图谱合一的功能。与多光谱传感器相比, IIM 具有光谱分辨率高、波段连续的特点。我们从地面应用系统中 IIM 2C 数据, 覆盖了月球南、北纬 75°之间大概 84% 的范围。为对 IIM 2C 数据进行辐射定标, 本文依据数据特征制定了一系列处理方法。

2 数据预处理

2.1 数据准备

IIM 2C 数据本身内置地理及控制点信息, 但不能直接

收稿日期: 2011-05-22, 修订日期: 2011-08-25

基金项目: 国家(863 计划)基金项目(2009AA122201)资助

作者简介: 王翔, 1983 年生, 中国地质大学国土资源与高新技术研究中心博士研究生 e-mail: wxcugb@qq.com

* 通讯联系人 e-mail: 3s@cugb.edu.cn

使用, 必须经过一定的提取方可使用^[6]。运用 IDL 编程技术提取出 IIM 2C 数据地理控制点信息, 对数据进行筛选、排查, 挑选其中数据质量较高的 296 轨拼接成全月正面(W90°~E90°)影像图。IIM 2C 各景数据在高纬度[N(S)65°~N(S)75°]有一定的重叠, 但重叠区域有错行(列), 采用手动相邻两轨数据进行精镶嵌。

2.2 条带坏点去除

IIM 2C 数据本身存在一定的列条带及坏点。均值滤波是典型的线性滤波算法, 其采用的主要方法为领域平均法^[7]。对于坏列(条纹), 这里采用临域加权均值法进行填补^[8], 计算坏列的临近的 N 列按远近加权平均, 将结果赋予该列, 以达到修复的目的(图 1)。

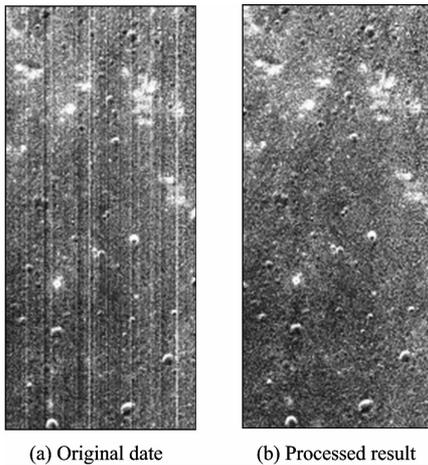


Fig. 1 Comparison diagram of band removal of Chang' E-1 IIM 2610 track data; determinant(65, 8897)

2.3 CCD 陈列响应非均匀性校正

Sagnac 干涉仪是 Chang' E-1 干涉成像光谱仪的关键部件。IIM 2C 数据在垂直于光谱仪推扫方向上具有不均一性, 对影像进行傅里叶频域变换亮度统计, 见图 2(a), 其曲线特征在横向上表现强度变化较大, 这与观察结果一致。

这种误差是由于 CCD 阵元间的耦合及信道增益、相位误差引起。当信号入射到多个 CCD 阵元构成的 CCD 阵列时; 理想状态下, 信道增益为 1, 相位差为 0, 但对于实际阵列, 由于加工误差以及其他因素的影响, 使得每个阵元的通道增益以及相移都会较之于理想情况时出现随机偏差。这里提出了采用基于子空间最大特征值法来进行校正。

当干涉光谱信号入射到 CCD 阵元时, 第 j 个采样点数据在 CCD 阵元中输出矢量为

$$x(j) = G \times a(\theta) + n(j) \quad (1)$$

G 为 M×1 维矩阵, G=matrix(g₁, g₂, ..., g_m), a(θ) 为理想情况下校正信号导向向量^[9,10], θ 为干涉光入射相位角, n(j) 为 CCD 阵元在第 j 个采样点时的噪声, g 为信道增益和相位差的阵元模拟公式^[11]。当获得 N 个干涉数据时, CCD 阵列协方差矩阵为

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^n x(j)x(j)^m \quad (2)$$

此时最大特征值对应特征向量为 E_s, 阵列协方差矩阵

依据信号子空间公式可以表示为

$$g = Q^{-1}E_s \quad (3)$$

$$[Q] = \begin{cases} a(p), & \text{for } p = q \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (4)$$

a(p) 为引导向量的第 p 个元素。g 我们求出的误差矩阵, 我们把误差矩阵经均值四次多项式(实验获得四次曲线与误差特征匹配较好)拟合成一条误差校正曲线

$$y = AX^4 + BX^3 + CX^2 + DX + E \quad (5)$$

将该四次函数校正曲线沿垂直于行程方向作用于 IIM 2C 数据, 对比处理前后影像饱和度图像(图 3), 经过饱和度拉伸的影像, 很好的表现了影像整体色调分布情况, 再次对影像进行亮度统计[图 2(b)]其强度表现均一, 符合自然图像特征。

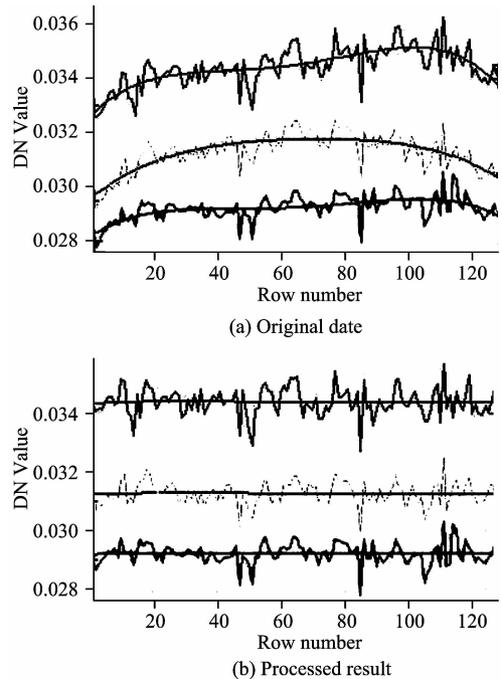


Fig. 2 Brightness curve of Statistics of IIM 2605 track on three band; smooth curve is trend line of fitting

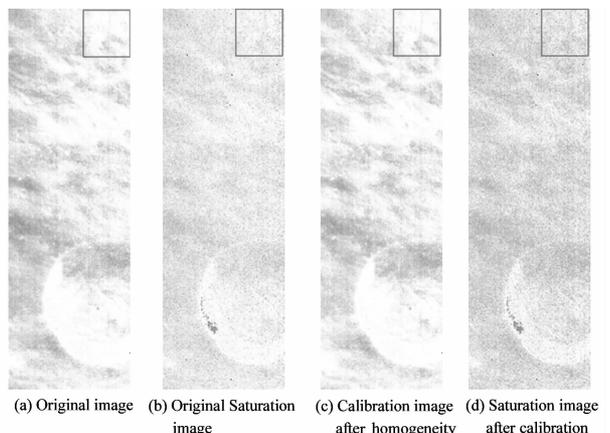


Fig. 3 Comparison diagram of heterogeneity of Chang' E-1 IIM 2605 track data; determinant(65, 12138)

2.4 几何校正、镶嵌

将统计出 IIM 月球正面数据, 进行头文件扫描, 剔除异常。通过自主编程 (IDL) 的校正程序对做过上述处理的 IIM 2C 数据进行地理几何校正, 设定月球球体参数为 (长、短轴=1 737 400.0), 根据 IIM 2C 数据特点, 推算出合适的像元大小 (0.007°, 0.007°), 进行地理几何校正, 误差不大于 2 个像元。

3 辐射定标

3.1 定标方法

定标是将传感器所得的测量值转换为绝对亮度或地表反射率、表面温度等与物理量有关的相对值的处理过程^[12]。任何仪器获得的裸影像数据由于电子线路、CCD 响应不一致性、光学膜层缺陷等原因, 都存在误差。然而这些仪器误差大部分具有规律性, 可以去除。此外, 定标也是标定并校正仪器系统误差的过程。按定标的过程分可以分为两个阶段, 实验室定标、在轨定标。

本次采用的 IIM 2C 数据实验室定标已完成, 这里主要处理在轨定标 (反射率反演)。月表反射率反演, 国际上主要有平场域法 (FlatField)、内部平均法 (IARR)、经验线性法 (EL) 等^[13]。平场域法利用一块面积大而平整、均一的月面平均光谱辐射值来模拟飞行时的太阳光谱, 以每个图像像元辐射值与它的比值作为月表反射比; 内部平均法假定一幅图像内部地物充分混杂, 整幅图像的平均光谱基本代表了太阳光谱信息; 经验线性法^[14]需要两个以上光谱均一、有一定面积大小的目标, 其中一个为暗目标, 另一个为亮目标。前两种方法所获得的定标光谱为相对光谱具有一定的局限性, 不能完全表现出月表矿物的波谱特征; 而经验线性法 (EL) 可以最大限度 (样品点足够多) 的表现出月表矿物波谱特征, 充分发挥数据本身的优势, 达到数据的优势利用的目的。基于上述讨论, 本文采用经验线性定标法对 Chang'E-1 数据进行

绝对定标。

实测两定标点的地面反射光谱 $R(\sigma)$, 并计算图像上对应像元点的平均辐射光谱 $r(\sigma)$ 。然后利用线性回归建立实际反射光谱与辐射光谱间的相关关系。

$$R(\sigma) = g \times r(\sigma) + e \quad (6)$$

其中 g 为乘性增益系数, e 为加性偏移系数。

线性回归被用在每一个波段中使得 DN 值 (IIM 2C 辐射量) 和反射率相符, 这等价于消除了太阳辐照度和其他辐射干扰, 达到最终定标的目的 (注: 在有多多个已知采样点的条件下, 通过最小二乘法获得最佳的增益系数及偏移系数^[15,16])。

3.2 定标参数的获取

2005 年 COSPAR 空间研究委员会、第八届月球勘探与利用国际大会通过了五个月球光谱定标点, 2006 年 11 月国际 LRO 科学工作会议上又增加了 Polar, Schrödinger, MS2 三个定标点 (表 2)。对于探月的研究, 不同的国家研制了适合自己的卫星, 搭载了不同的探月传感器^[17]; 但是, 并不是所有的定标点都适用于这些探月传感器。为此 Pieters, James 等提出了优选月球定标点方案。本文依据 Chang'E-1 IIM2C 数据特点及定标点处物质组成及其地理环境特点, 选取 Apollo16 62231, Apollo15 样品为 Chang'E-1 IIM 2C 数据定标点。Apollo16 62231 样品点为高地区^[18], 相对物质为长石、成熟的土壤和新鲜的大小不一的撞击坑, 物质分布相对均一, 有利于对月光谱定标。Apollo15 定标点位于月海区域 Hadley Rille 北部接近亚平宁山脉^[19], 这个点的演化记录了基础地质过程的差异, 是最好的多样和完整的数据, 样品包括两种不同的的月海玄武岩类型, 还有一组高地岩石包括斜长石, 镁质火山岩, 撞击熔化物、粒变岩和角闪石, 为月球遥感数据定标提供了数据基础。

从 Brown 大学月球岩石矿物数据库得到 Apollo16 62231 和 Apollo15 (15071, 15041) 样品的双向发射率波谱, 波谱跨越了 300~2 550 nm; 而 Chang'E-1 IIM 2C 数据的波谱带宽

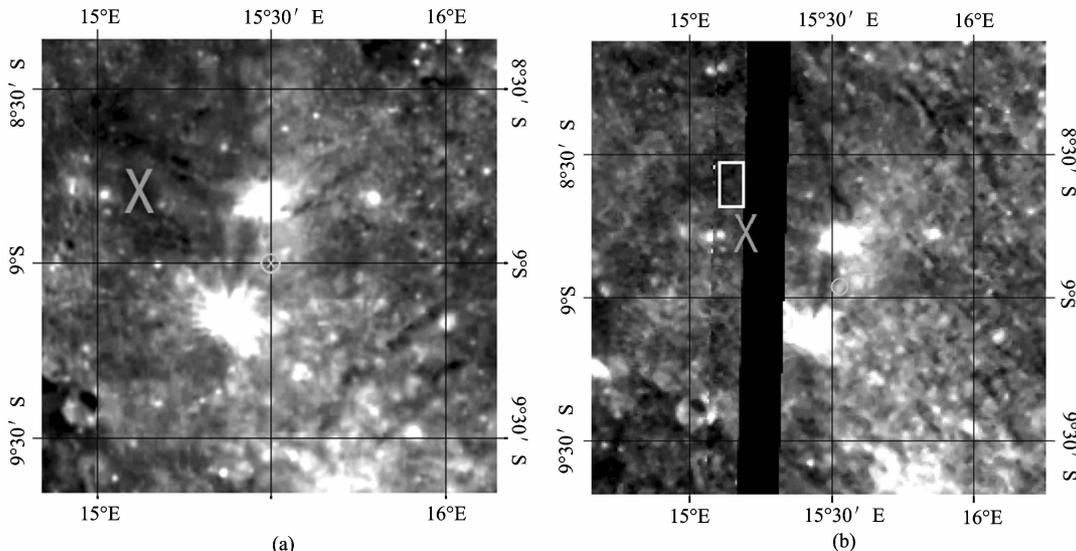


Fig. 4 (a) Data of Clementine (center wavelength 1 000 nm); (b): Data of Chang'E-1 IIM (center wavelength 561.066 7 nm); (x): collection point of (Apollo16 62231 sample; white fram is mask region; cycle is Apollo16 lunar-landing point

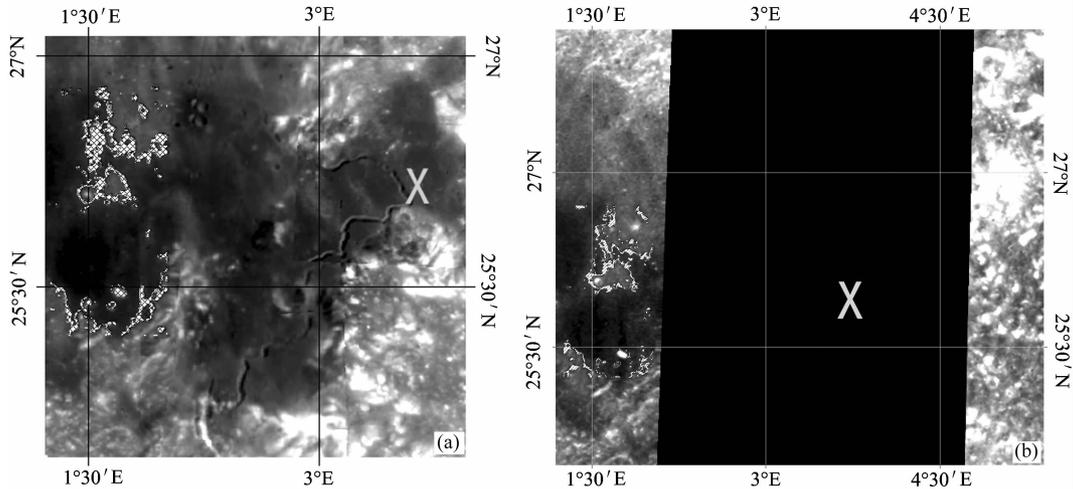


Fig. 5 (a) Data of Clementine (center wavelength 1 000 nm); (b); Data of Chang'E-1 IIM(center wavelength 561.066 7 nm); grid and slash are mask region; (x) is Apollo15 lunar-landing point

为 480~960 nm, 且其中心波谱不一一对应。对这两种 Apollo 样品波谱进行高斯重采样, 使其重采样至 Chang'E-1 IIM 2C 数据的波谱范围, 并作为地面反射光谱 $R(\sigma)$ 。

Apollo62231 以及 Apollo 15 两点经纬度坐标分布为 15.5E, 9.0S 和 3.7E, 26.1N。经坐标匹配发现这两个定标点在 Chang'E-1 均缺失数据, 为此采用非监督分类法及光谱角分类方法, 提取 Clementine 数据(S15_015、N15_015 轨)上 Apollo16 62231、Apollo15 土壤样品点, 选择均一程度高及光谱特征基本一致的区域, 利用该区域与嫦娥 Chang'E-1 数据进行对比镶嵌配准^[20], 在 Chang'E-1 数据上提取相同目标为掩膜区域, 求取掩膜区域均值光谱为定标光谱, 作为平均辐射光谱 $r(\sigma)$ (图 4, 图 5)。

经过上述计算最终得到了地面反射光谱 $R(\sigma)$ 以及平均辐射光谱 $r(\sigma)$ 波谱。从获得的波谱可知 Chang'E-1 上的平均辐射光谱明显要高于地面反射光谱(Apollo15、16), 且差异较大。在获得了“地面反射光谱 $R(\sigma)$ ”(Apollo16 62231、Apollo15 点的 IIM 2C 重采样波谱)及“平均辐射光谱 $r(\sigma)$ ”(IIM 2C 类似样品点均值波谱)的情况下, 采用上述线性定标的方法进行 Chang'E-1 IIM 2C 数据光谱定标。

3.3 降噪处理

噪声的存在是影响仪器单次测量精度的根本原因, 也是任何仪器都无法彻底克服的瓶颈。对于光学仪器, 噪声可以分为光子噪声和电子学噪声两大类, 前者与随输入光能量的增加而增加, 而后者则与光能量无关。在宽波段、能量足够强光输入情况下, 仪器的电子学噪声的影响可以降低, 光子噪声是最基本的物理限制^[21]。

在月球遥感中, 地质应用的等效噪声反射比需求为小于 1%, Chang'E-1 干涉成像光谱仪除在最后一个谱段(32 波段)为 1.4%外, 均远小于 1%; 由于短波区域输入能量较低, 短波的测量可能存在误差。所以我们将 Chang'E-1 IIM 2C 第 32 波段剔除, 而短波波段可能图 6(a)有较大误差。我们通过简单的信噪比分析, 图 6 可以得出 Chang'E-1 IIM 2C 前 6 个波段可能存在较大的噪声; 同时证明第 32 波段的噪

声最大, 可利用率最低, 这与实验室分析结果相一致。

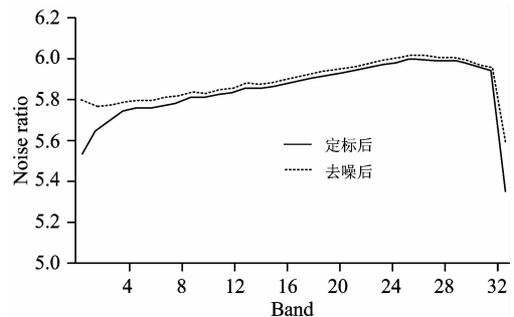


Fig. 6 Signal to noise ratio of Chang'E-1 IIM data

由于信号在空间上(或者时间域)是有一定连续性的, 因此在小波域, 有效信号所产生的小波系数其模值往往较大; 因此噪声经过小波变换, 在小波阈仍然表现为很强的随机性, 通常仍认为是高斯白噪^[22,23]。那么就得到这样一个结论: 在小波域, 有效信号对应的系数很大, 而噪声对应的系数很小。噪声在小波域对应的系数满足高斯白噪分布。对小波系数采取自适应的处理方式, 对边缘细节的小波系数保持不变, 其他小波系数采用模糊软阈值(sigma)处理^[24]; 根据高斯分布的特性, 绝大部分(99.99%)噪声系数都位于 $[-3 \times \sigma, 3 \times \sigma]$ 区间内。因此, 只要将区间 $[-3 \times \sigma, 3 \times \sigma]$ 内的系数置零, 就能最大程度抑制噪声, 同时, 只是稍微损伤有效信号。将经过阈值处理后的小波系数重构, 就可以得到去噪后的信号。基于上述理论分析, 对定标后的 Chang'E-1 干涉影像进行去噪处理, 对比其信噪比(图 6)可知, 噪声得到的很好的压制(除去第 32 波段); 与此同时很好的保持了原图像的特征。

3.4 结果评估

将 Apollo16 62231、Apollo15 样品点处, 经过线性定标和降噪处理后 Chang'E-1 干涉影像处的波谱特征与其标准波谱进行对比, 为对比校正前后的波谱特征结果可知, 校正的波谱与样品波谱特征基本一致, 误差百分数 $-7.20\% \sim$

4.40%(图7),误差较小;校正结果可靠。

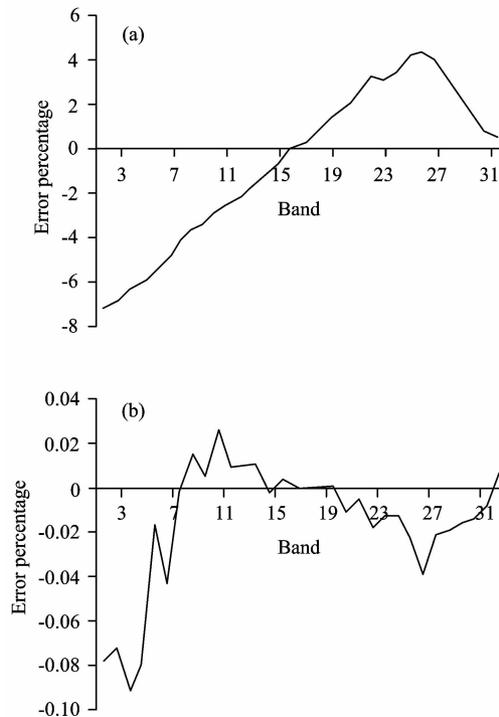


Fig. 7 Percentage curve of correction spectrum error

(a): Apollo15 region; (b): Apollo16 region

4 总结

对 Chang'E-1 IIM 2C 数据进行较为系统的分析,在充分了解数据的形成机理的前提下,建立了 IIM2C 级数据的

处理方法。通过理论探讨 CCD 阵列横向不均一时,提出了利用子空间最大特征值法对影像数据进行横向不均一增益校正,结果显著。在进行几何校正及镶嵌时,发现影像数据重叠区存在一定的错位,并且按照一定的变化范围递增(递减),据此推断,嫦娥一号卫星在对月进行观测时,随着时间的推移其轨道变化误差呈一定的线性关系。全面分析了 575 轨 Chang'E-1 IIM 2C 数据,通过自编程序及手动对各轨数据进行镶嵌拼接,最后将定标校正后的数据与 CCD 数据进行了几何精校正。

将几何校正后的数据采用国际上较为流行的经验线性法进行绝对光谱定标,对国际上对月定标点的选取进行了分析,认为 Chang'E-1 IIM 2C 的辐射定标采用 Apollo16 62231、Apollo15 样品点较为可行;同时由于准确的月球实际采样点数据较少,这里首次通过对比 Clementine 数据,采用非监督分类及光谱角法获得与这两个校正样品点类似区域的均值波谱,求得 Chang'E-1 IIM 2C 数据的增益系数,对数据进行了绝对定标;首次对绝对定标结果进行信噪分析,首次采用自适应小波变换对线性定标的 IIM 2C 数据进行了辐射修正。对比定标采样点处的波谱特征以及信噪比关系;其结果大大提高了 IIM 2C 数据质量,特别是增强了前六个波段数据的可利用性,但由于 Chang'E-1 干涉光谱仪自身的一些问题,其第 32 波段可利用能力极低。最终获得了第一幅 Chang'E-1 IIM 2C 几何校正与光谱绝对校正的月表正面图像,数据信息提取的结果分析表明,校正数据达到了进行矿物光谱填图,月表成熟度与矿物分布关系等月球科学研究的使用要求。

致谢: 山西省信息遥感中心范海明,国土资源航遥中心闫柏琨,南京大学吴昀昭以及中国地质大学(北京)李珂、于萍萍、于淼等给予的帮助。

References

- [1] OUYANG Zi-yuan, LI Chun-lai, ZOU Yong-liao, et al. Science in China-Earth Sciences, 2010, 53(11): 1565.
- [2] OUYANG Zi-yuan(欧阳自远). Introduction to Lunar Science(月球科学概论). Beijing: China Astronautic Publishing House(北京:中国宇航出版社), 2005. 21.
- [3] Pieters C M. The Moon as a Calibration Standard Enabled by Lunar Samples. In: New Views of the Moon II: Understanding the Moon Through the Integration of Diverse Datasets, Flagstaff. 1999.
- [4] Pieters C M, Head J W, Isaacson P, et al. Adv. Space Res., 2008, 42(2): 248.
- [5] Wu Y Z, Xu X S, Xie Z D, et al. Science In China Series G-physics Mechanics & Astronomy, 2009, 52(12): 2160.
- [6] Wu Y Z, Zheng Y C, Zou Y L, et al. Planetary and Space Science, 2010, 58(14-15): 1922.
- [7] Chang S G, Yu B, Vetter li M. IEEE Transaction on Image Processing, 2000, 9(9): 1532.
- [8] HAN Ling, DONG Lian-feng, ZHANG Min, et al(韩玲,董连凤,张敏,等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2009, 29(12): 3333.
- [9] CHENG Chun-yue, LÜ Ying-hua(程春悦,吕英华). Signal Processing(信号处理), 2007, 23(3): 3.
- [10] Friedlander B, Weiss A J. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1991, 39(3): 273.
- [11] Vorobyov S A, Gershman A B, Luo Z Q. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(2): 313.
- [12] XU Tao(胥涛). Principles and Methods of Reflectance Spectroscopy and Thermal Emission and Their Application to Lunar Exploration(利用反射光谱和热辐射探测月球表面物质的理论和方法). Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences(北京:中国科学院研究生院(地球化学研究所)), CNKI: CDMD: 1. 2005. 013341, 2004.
- [13] Tompkins S, Pieters C M. Meteoritics & Planetary Science, 2010, 45(7): 1152.
- [14] ZHAO Ying-shi(赵英时). Principle and Method of Remote Sentine Application(遥感应用分析原理与方法). Beijing: Science Press(北京:科学出版社), 2003. 127.

- [15] Yan Bokun, Wang Runsheng, Gan Fuping, et al. *Icarus*, 2010, 208(1): 11.
- [16] CHANG Jing, LIU Dong. *Journal of Jilin University(Science Edition)*, 2010, 48(3): 27.
- [17] Mardling R A. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2010, 407(2): 108.
- [18] Petro N E, Pieters C M. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(E09005): 13. doi: 10.1029/2005JE002559.
- [19] Scott D R, Worden A M, Irwin J B. *NASA*, 1972, 289(4): 1.
- [20] Pieters C M, Pratt S. *Earth-Based Near-Infrared Collection of Spectra for the Moon: A new PDS Data Set*. *Lunar Planet Sci XXXI*, 2000. 2059.
- [21] Blewett D T, Denevi B W, Robinson M S, et al. *ICARUS*, 2010, 209(1): 239.
- [22] Zhang Y D, Wu L N. *Science in China Series F-Information Sciences*, 2008, 51(12): 2115.
- [23] Hsia C H, Li W M, Chang J S. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2011, 34(5): 629.
- [24] Luo H G, Zhu L M, Ding H. *Signal Processing*, 2006, 86(7): 1728.

Information Extraction of the Chang'E-1 Interference Imaging Spectrometer (IIM) 2C Data

WANG Xiang^{1,2}, CHEN Jian-ping^{1,2*}, LI Jian-feng^{1,2}, SHI Rui^{1,2}, WU Zhao^{1,2}

1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. The Land Resources Information Development and Research Key Laboratory of Beijing, Beijing 100083, China

Abstract Through analysis of solar azimuth of Chang'E-1 IIM data, the data of high-angle were chosen to do radiometric calibration. The method of neighbourhood averaging and neighbourhood weighted averaging were adopted to repair original data which contains bad points and bands. Because of interference imaging spectrometer's inherent problem and CCD array gain distortion, the image displays discontinuity of transverse response. By using the method of subspace maximum eigenvalue to calibrate image, the statistical result of processed images shows homogeneity on intensity of radiance. The empirical linear method was adopted to calibrate IIM data absolutely. Meanwhile, in order to correct bias coefficient of data which has been calibrated and de-noised, the method of wavelet transform was adopted to modify data of radiometric calibration for the first time, the final available IIM 2C data were confirmed. Compared with the data which has been accredited, the analysis proposal of IIM 2C data was established. Then the first reflectivity image of the lunar nearside based on Chang'E-1 IIM 2C was accomplished.

Keywords Chang'E-1; Interference imaging spectrometer(iim); Ccd array; Calibration; Wavelet transform

(Received May 22, 2011; accepted Aug. 25, 2011)

* Corresponding author