论文

利用相比率影像方法研究月球月谷 Schröteri 区域

KAYDASH V.^{①*}, SHKURATOV Y.^{①②}, 张昊^③^① Astronomical Institute of Kharkov V. N. Karazin National University, Sumskaia 35, Kharkov 61022, Ukraine;^② Institute of Radio Astronomy of NASU, Chervonopraporna 4, Kharkov 61002, Ukraine;^③ 中国地质大学(武汉)地球科学学院行星科学研究所, 武汉 430074

*联系人, E-mail: vgkaydash@gmail.com

收稿日期: 2012-07-23; 接受日期: 2012-08-20; 网络出版日期: 2012-12-11

自然科学基金(批准号: 41071229)、中央高校基本科研业务费专项资金以及教育部留学回国人员启动基金(编号: 2011012012)资助项目

摘要 我们利用月球侦察轨道器(LRO)的窄角相机(NAC)数据, 使用一种新的光学遥感方法—相比率影像法, 来评估月表亚分辨率尺度的粗糙度. 我们用该方法对月面谷 Vallis Schröteri 地区的三维相比率影像进行分析后发现, 在月面谷侧面上风化物的复杂运动模式与撞击坑并无关联, 而是由风化物 and 岩屑形成的, 而非冲击熔融.

关键词 行星表面, 月球表面特征, 月球表面撞击, 遥感观测技术

PACS: 96.12.Kz, 96.20.Dt, 96.20.Ka, 95.75.Rs

doi: 10.1360/132012-375

1 前言

相比率影像技术可以定性提取表面重新覆盖事件发生的强度, 因而是研究包括诸如月表在内的行星表面地质过程的重要光学遥感手段之一^[1–9]. 技术的核心为月表反射率 $R(\alpha)$ 随相角 α 变化的参数影像. 例如, 图 1 为利用地面观测数据^[10]得到的典型月海和高地区域的月表反射率随相角变化的月相曲线. 图中显示, 随着相角的增加, 反射率急剧减小(例如见文献[11]).

为将反射率 $R(\alpha)$ 的相角依赖关系参数化, 我们使用在两个不同相角位置的反射率比值, $R(\alpha_1)/R(\alpha_2)$ (式中 α_1 和 α_2 为两个不同的相角, 例如 20° 和 50°). 该比值受月表风化层的疏松度和粗糙度等因素影响.

我们将在不同相角下获取的影像数据进行比率计算, 从而可以得到月表影像中每个像素的月相曲线斜率. 如此得到的相比率影像抑制了月表本身反照率变化的因素, 而反照率的变化极大地受到藏影效应的影响^[1–4, 7–10, 12–15].

因此, 相函数斜率的影像制图可以作为一种光学遥感方法用于估计行星(月球)的表面粗糙度. 本文中“粗糙度”表示任何可以引起投影的结构单元, 因此在不同尺度下, 粗糙度参数是不同的. 例如对于可见光, 从几十微米到几毫米的“小尺度”粗糙度衡量的是行星表面风化层中密堆积颗粒的尺度; 而在大于几个毫米的更大尺度下, 粗糙度则可以表征表面形态的斜率特征. 在下文中, “高粗糙度”一词代表着表面能够引起更多投影. 在 1° – 20° 的小相角范围内,

引用格式: Kaydash V, Shkuratov Y, 张昊. 利用相比率影像方法研究月球月谷 Schröteri 区域. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 104–110
Kaydash V, Shkuratov Y, Zhang H. Phase-ratio imagery of the Moon: Vallis Schröteri (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: 104–110, doi: 10.1360/132012-375

图 1 望远镜测量到的月海(实线)和高地(虚线)月相反射曲线^[10]

Figure 1 Examples of lunar phase curves of reflectance for mare (solid curve) and high-land (dashed curve) areas measured with a telescope [10].

颗粒之间的互相投影效果占据着 $R(\alpha_1)/R(\alpha_2)$ 的比值特征;而在 20° – 70° 的中间相角范围区,无法分辨的投影效果占据着 $R(\alpha_1)/R(\alpha_2)$ 的比值特征.然而对于后者范围,颗粒间的多重散射和单个颗粒的单散射相函数效应也很显著;如果相角 α 再增大,由于大尺度地形粗糙度引起很多可以分辨的投影,因而相比率影像方法将变得十分困难和不切实际.

Akimov 和 Shkuratov^[12]首先对月球上具有相同对比度以及相似天平动参数但在不同相角下拍摄的影像利用摄影扣除方法进行了研究.该研究发现,在波长 $\lambda=630$ nm,较为明亮的撞击坑(例如第谷和哥白尼坑)区域比具有中等反照率区域展现出更小的相比率 $R(3.2^\circ)/R(14.5^\circ)$.在此基础上,通过对望远镜观测影像进行计算机处理,将影像变换为具有相同的天平动和尺度,得到了月球正面的几个相比率影像^[1,6,13,16].该方法经扩展后被应用于各种探测器获取的影像数据分析^[3,4,6,7,9,14,15].

最近,在月面西南部分区域发现了几处光度正异常,即 Oceanus Procellarum 异常^[16].正异常意味着那里的表面粗糙度较高而且月相曲线陡峭,反之则为负异常(例如见文献[2]).这些正异常可以被解释为由较小撞击物组成的陨石群撞击所产生新鲜浅层风

化物的扰动.我们利用相比率影像方法的研究表明,阿波罗 14, 15 和 17 计划任务的登陆地区为一处大约 $170\text{ m}\times 220\text{ m}$ 大小、具有光度负异常的区域^[7].这是由于登陆器发动机喷射气体对粗糙表面所进行的平滑效应所产生的.

本文我们把相比率方法应用于月球侦察轨道器(LRO)窄角相机(NAC)^[17]所获取数据,来研究 Schröteri 月谷坑壁上由自然原因引起的风化物结构.

2 方法描述和数据

如前述,分析一个表面相函数变化最简单的方法为获取在两个不同相角下的反射率影像,在进行配准后计算其比值 $R(\alpha_1)/R(\alpha_2)$.影像配准过程即为在几何上将两幅影像对准,使得两幅影像中代表同样物体的对应像素可以被比较和进行数据融合.待校准影像和参考影像的几何对应关系可以使用一套连接点通过插值过程获得.此方法类似于颜色比影像方法(例如见文献[6,18,19]).

对于月表人们通常观察到,在中间数值的相角区域对于两个相角如果有 $\alpha_1 > \alpha_2$,表面反照率比值 $A(\alpha_1)/A(\alpha_2)$ 与反照率 $A(\alpha_1)$ 具有直接相关性.其物理原因为:亮度越高的表面,其颗粒间或颗粒内的多重散射就越强,因而对阴影区所引起的“照明”效果就越强;这种“二级照射”的结果会使得相曲线的斜率减小,引起反照率和相比率之间产生正相关.因此,偏离此规律可能表明着月表风化物的结构异常.例如,月表的明亮细节将导致相曲线斜率增加,这意味着表面粗糙度大到不仅可以补偿反照率效应,而且还能产生相比率异常.

我们使用一组月球侦察轨道器的窄角相机在委托、标称和科学阶段获取的经过定标后的影像数据^[17]来获得相比率.月球侦察轨道器的窄角相机影像的定标路线为,通过使用一套定标文件,在考虑了曝光时间、暗影像并进行了平场校正后,将原始信号转换为单位为 $\mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{nm})$ 的辐亮度数据;再利用太月距离为 1 个天文单位的太阳辐照度数据,将辐亮度数据转换为辐亮度因子^[11].

由于月球侦察轨道器的低轨和窄角相机的高空间分辨率(在标称和科学任务阶段为 $0.5\text{ m}/\text{像素}$)等特性,对于在不同轨道获取的同样场景的影像之间存在较大的互相扭曲效应.对于光度分析,我们使用月球侦察轨道器 SPICE 核心的最新版^[20]将影像通过空

间变换到一个共同投影区. 这一 SPICE 信息是基于卫星上仪器所记录的飞行器轨道、朝向以及数据获取的精确时间等信息, 使我们可以计算月面影像中每个像素的月球测量学坐标. 由于 SPICE 核心将月球作为一个直径为 1737.4 km 的球体, 因此在使用 SPICE 计算月球测量学坐标时, 需要考虑月表的全球地貌地形因素. 这里我们使用基于月球侦察轨道器月球轨道器激光高度计 (LOLA) 测量数据获得的月球全球数字高度模型 (DEM)^[21]: <http://pds-geosciences.wustl.edu/missions/lro/lola.htm>.

经过以上处理后, 影像间剩余的空间差异是由月貌地形以及飞行器指向精确度的剩余误差所引起的. 应该注意的是, 现今月球轨道器激光高度计测量数据获得的月球全球数字高度模型的空间分辨率要远低于窄角相机月面地形分辨率 (~0.5 m/像素). 出于这个原因, 我们要通过影像配准步骤找到影像间视差位移; 最终具有亚像素准确度的影像间配准由图像变形几何变换 (橡胶板校正) 得到. 在这一步骤中我们通过将框架间的局域相关性进行最大化来得到所需的局域位移.

相比率影像中所使用的成分影像应该在入射天顶角和方位角相似而相角不同的情况下获得, 这样得到的相比率影像才不会被与表面地形有关的模式影响. 另外, 由观测天顶角变化产生的影响和由入射光天顶角和方位角变化所产生的影响有着相当显著的区别: 在前种情况下, 即使观测天顶角有相当大的变化, 我们处理的图像模式仍然具有相似的由视差位移引起的亮度模式变形; 相比之下, 入射天顶角和方位角即使只有很小的变化, 也会引起与起始影像显著不同的模式变化.

这些影像使我们不但可以研究相比率, 还可以利用由配准步骤获得的视差数据来产生景观的立体影像. 由于立体影像具有三维立体效果, 因而是研究各种地形景观非常有用的工具. 初看上去, 如何从两张影像中同时计算立体影像和相比率并不是很直观. 我们首先使用具有不同相角的影像计算视差场, 并忽略由于相比率不同所引起的差异, 因为这样的影响相对于视差效应可以忽略; 之后, 当使用视差数据完成配准后, 我们可以计算相比率并把这些分布在立体影像中进行转换.

在月球侦察轨道器的窄角相机的影像收集中, 有很多不同区域的数据对适于进行相比率成像研究. 这其中的一个区域是 Schröteri 月谷的侧翼内部^[8]. 图

2 中所示的月面组成单元使用的是克莱门汀马赛克镶嵌底图 (所用波长为 750 nm, 分辨率为 100 m/像素). 图 3 为月球侦察轨道器的窄角相机获取相角接近 66° 的 Schröteri 月谷影像 (M102486385LC, 分辨率为 1.46 m/像素) (影像细节见表 1) 中的一小部分, 在图 2 中以箭头标出. 图 4 为相同区域的相比率影像 (78°/66°); 这里我们使用了影像数据 M102479227LC (1.43 m/像素, $\alpha=78^\circ$) 作为第二成分图. 图 4 中的暗色调部分对应于高粗糙度的区域, 即月相曲线具有更陡斜率的区域. 由这些影像生成的立体彩像在图 5(a) 和 (b) 示出. 我们将在下边对这些图进行讨论.

3 讨论

我们研究月球上最大的弯曲迂回状月面谷: Schröteri 月谷^[22]中的一部分区域. 该月面谷位于由玄武岩质月海环绕的地形隆凸 Aristarchus 台地. 对 Schröteri 月谷的研究对于理解 Aristarchus 台地的起源和演化具有十分重要的意义.

这个长度为 125 km 的月面谷很可能起源于持续的火山岩浆所造成的热侵蚀和机械侵蚀作用^[23]. 图 2 中箭头所标区域 Cobra head 具有拉长形态的类火山口特征, Schröteri 月谷在靠近此区域的深度在 500–700 m 左右^[23]. 该特征所具有的复杂形态表明其成因无法用单一的侵位过程解释. 尤其是, Schröteri 月谷展现出在一个在主月谷内岩浆固化晚期形成的平底特征^[24].

图 2 克莱门汀拍摄的 Vallis Schröteri 地区
Figure 2 A Vallis Schröteri region as seen from Clementine.

图 3 LROC NAC 拍摄的 Vallis Schröteri 区域
北边朝上, 像素值经定标后为辐亮度因子 $\mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{nm})$

Figure 3 Vallis Schröteri imaged by the LROC NAC. Pixels are calibrated in radiance factor units $\mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{nm})$. North is up.

表 1 文中所用月球 Vallis Shröteri 区域由 LRO NAC 获取图像信息

Table 1 Characteristics of the used images acquired by LRO NAC for the Vallis Shröteri

各类参数	图像编号	
	M102479227LC	M102486385LC
分辨率 (m/像素)	1.43	1.46
发射角 (°)	1.77	11.24
入射角 (°)	76.18	77.09
相角 (°)	77.95	65.93
子太阳方位 (°)	186.7	185.74
子太阳纬度 (°)	0.15	0.15
子太阳经度 (°)	235.96	234.95
图像中心纬度 (°)	24.74	24.74
图像中心经度 (°)	310.79	310.78

图 3 示出 Cobra head 侧翼东部的反射影像. 如上文所提, 我们选取了 M102486385LC (1.46 m/像素分辨率, $\alpha=66^\circ$) 影像中被定标为辐亮度因子像素的一小部分区域; 在图 3 中还标出了相应的信号单位标尺和比例尺. Cobra head 单元的侧翼显示出亮度变化(从右至左为下坡方向), 其模式可能表现出了照明条件、表面材料的反照率和月相曲线斜率等因素. 注意, 为了得到相比率影像, 我们把图 3 所示影像和具有更大相角的框架 M102479227LC (1.43 m/像素, $\alpha=78^\circ$, 见表 1)做了配准. 配准后的图像比值 ($78^\circ/66^\circ$) 在图 4 示出. 图中的横条标识出相比率的动态范围和空间尺度. 由于此幅影像在很大程度上不存在反照率的影响因素, 因此可以反应出相函数的斜率信息. 图 4 中的暗点对应于相斜率的增加, 属于正光度异常, 有些用箭头标出. 而图中的一些亮点对应于相斜率值较小的区域(负光度异常).

很显然, 图 3 和 4 的视觉比较显示出反照率和相比率在空间分布上的不一致. 正如可以预期到的, 对于某些特征而言, 相比率和反照率是具有相关性的, 而这一相关可以用于补偿相比率影像中的反照率分布(例如文献[9]). 然而, 在图 3 和 4 的情形中, 偏离相关是如此显著以至于月表风化物结构中的反常可以在不补偿相关性的情况下被探测到; 许多在反照率影像中很难被分辨出的细节, 可以在粗糙度影像中被清晰地分辨出来.

具有正光度异常的区域对应于具有高表面粗糙度地区, 而高粗糙度则是由自然引发的, 尺寸在影像分辨率左右(~ 1.5 m)的巨砾、石块和碎石在斜坡过程

图 4 与图 3 相同区域的相比率影像(78°/66°)
像素 DN 值的单位为相对相斜率值

Figure 4 The phase-ratio image (78°/66°) of the same area as in Figure 3. Pixels DN are given in relative phase slope units.

中积聚所造成的。相比率影像使我们区分出向下移动的溪流形状。残渣在重力作用下被向下拉并在壁底或小型地形低洼处和谷底线等处被收集。而负光度异常则可能显示出由微陨石轰击作用侵蚀所产生的灰尘在重力作用下顺坡向下流动。这些尘埃的雪崩可以把局域地形填平从而使得表面更加光滑。蠕动和山崩也可以触发月面尘埃雪崩过程的发生。

图 5(a)和(b)示出 Schröteri 月谷侧翼的亮度($\alpha = 66^\circ$)和相比率(78°/66°)的立体影像。我们可以看到,由上层风化物变蚀所引起的光度异常在反射影像中很难被分辨出(图 5(a)). 这是由于入射条件和反照

图 5 Vallis Schröteri 侧面的彩色立体图

(a) 相角 $\alpha = 66^\circ$ 的亮度; (b) 相比率(78°/66°)

Figure 5 Anaglyphs of the Vallis Schröteri flank for (a) brightness ($\alpha = 66^\circ$); (b) phase-ratio (78°/66°).

率的变化所产生的影响在相比率影像中(见图 5(b))被显著弱化了. 在月面谷侧翼上可见的流动清楚地表明, 流动是由易碎土壤运动引起的, 而非诸如新鲜撞击坑内部斜坡上经常可见的撞击熔融(例如见文献[9]).

4 结论

本研究表明, 相比率法是寻找月表光度异常区域非常有效的方法. 相比率影像法使我们可以利用

遥感方法来确定月表的微结构和粗糙度. 该方法可以被广泛用于遥感探测月球、火星、小行星以及行星卫星上诸如新鲜滑塌区域、被侵蚀表面材料, 以及撞击坑坑壁、阶带和坑底积攒的尘埃等表面地质特征. 在 Schröteri 月谷侧翼区域观察到的各类特征与各类新形成撞击坑内侧翼的流动特征相符(例如文献[9]), 因而这类特征应被解释为风化物 and 碎屑而非撞击熔融流动.

参考文献

- Shkuratov Y G, Starukhina L V, Kreslavsky M A, et al. Principle of perturbation invariance in photometry of atmosphereless celestial bodies. *Icarus*, 1994, 109: 168–190
- Kreslavsky M A, Shkuratov Y G. Photometric anomalies of the lunar surface: Results from Clementine data. *J Geophys Res*, 2003, 108: 5015
- Kaydash V G, Gerasimenko S Y, Shkuratov Y G, et al. Photometric function variations observed on the near side of the Moon: Mapping. *Sol Syst Res*, 2009, 43: 89–99
- Kaydash V, Kreslavsky M, Shkuratov Y, et al. Photometric anomalies of the lunar surface studied with SMART-1 AMIE data. *Icarus*, 2009, 202: 393–413
- Kaydash V, Shkuratov Y, Videen G. Phase-ratio imagery as a planetary remote-sensing tool. *J Quant Spectrosc Radiat Trans*, 2012, 113: 2601–2607
- Shkuratov Y, Kaydash V, Korokhin V, et al. Optical measurements of the Moon as a tool to study its surface. *Planet Space Sci*, 2011, 59: 1326–1371
- Kaydash V, Shkuratov Y, Korokhin V, et al. Photometric anomalies in the Apollo landing sites as seen from the lunar reconnaissance orbiter. *Icarus*, 2011, 211: 89–96
- Kaydash V, Shkuratov Y. Phase-ratio imagery as a tool to study the lunar surface structure: Example of Vallis Schröteri. In: 42nd Lunar and Planetary Science Conference, March 7–11, 2011 at the Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1608, 1361
- Shkuratov Y, Kaydash V, Videen G. The lunar crater Giordano Bruno as seen with optical roughness imagery. *Icarus*, 2012, 218: 525–533
- Velikodsky Y I, Opanasenko N V, Akimov L A, et al. New Earth-based absolute photometry of the Moon. *Icarus*, 2011, 214: 30–45
- Hapke B. *Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993
- Akimov L A, Shkuratov Y G. The distribution of the brightness phase gradient over the lunar surface in two spectral bands, preliminary investigations. *Astron Tsirk*, 1981: 3–6
- Korokhin V V, Akimov L A. Mapping of the phase parameters of the lunar-surface brightness. *Sol Syst Res*, 1997, 31: 128–136
- Kreslavsky M A, Shkuratov Y G, Velikodsky Y I, et al. Photometric properties of the lunar surface derived from Clementine observations. *J Geophys Res*, 2000, 105(E8): 20281–20296
- Kaydash V G, Shkuratov Y G. Structural disturbances of the lunar surface caused by spacecraft. *Sol Syst Res*, 2012, 46: 108–118
- Shkuratov Y, Kaydash V, Gerasimenko S, et al. Probable swirls detected as photometric anomalies in Oceanus Procellarum. *Icarus*, 2010, 208: 20–30
- Robinson M S, Brylow S M, Tschimmel M, et al. Lunar reconnaissance orbiter camera (LROC) instrument overview. *Space Sci Rev*, 2010, 150: 81–124
- McCord T B, Pieters C, Feiberg M A. Multispectral mapping of the lunar surface using ground based telescopes. *Icarus*, 1976, 29: 1–34
- Shkuratov Y G, Kaydash V G, Opanasenko N V. Iron and titanium abundance and maturity degree distribution on lunar nearside. *Icarus*, 1999, 137: 222–234
- Mattson S S, Bartels A, Boyd A, et al. Continuing analysis of spacecraft jitter in LROC-NAC. In: 42nd Lunar and Planetary Science Conference, March 7–11, 2011 at the Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1608, 2756
- Smith D E, Zuber M T, Jackson G B, et al. The lunar orbiter laser altimeter investigation on the lunar reconnaissance orbiter mission. *Space Sci Rev*, 2010, 150: 209–241
- Wilhelms D. *Geologic History of the Moon*. Washington: United States Government Printing Office, 1987
- Honda C, Morota T, Yokota Y, et al. Morphologic characteristics of the Vallis Schröteri. In: 40th Lunar and Planetary Science Conference (Lunar and Planetary Science XL), March 23–27, 2009 in the Woodlands, Texas, id. 1524
- Garry W B, Bleacher J E, Warner N A. Emplacement scenarios for Vallis Schröteri, Aristarchus Plateau, the Moon. In: 39th Lunar and Planetary Science Conference (Lunar and Planetary Science XXXIX), March 10–14, 2008 in the Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1391, 2261

Phase-ratio imagery of the Moon: Vallis Schröteri

KAYDASH V.^{1*}, SHKURATOV Y.^{1,2} & ZHANG Hao³

¹ *Astronomical Institute of Kharkov V. N. Karazin National University, Sums kaya 35, Kharkov 61022, Ukraine;*

² *Institute of Radio Astronomy of NASU, Chervonopraporna 4, Kharkov 61002, Ukraine;*

³ *Planetary Science Institute, Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

A new optical remote-sensing technique called phase-ratio imagery, which suggests an estimation of sub-resolution roughness of the lunar surface, is presented. Lunar images acquired by the Narrow Angle Camera on the Lunar Reconnaissance Orbiter are used. The technique is applied to the 3D phase-ratio imagery of Vallis Schröteri region. This allows observations of patterns of complicated movements of regolith materials on the rille flank, which can be attributed to regolith/debris taluses, definitely not to impact melt as this structure is not associated with an impact crater.

planetary surfaces, lunar features and landmarks, lunar impacts and cratering, remote observing techniques

PACS: 96.12.Kz, 96.20.Dt, 96.20.Ka, 95.75.Rs

doi: 10.1360/132012-375