



月球表面遥感图像的地形辐射改正原理研究

李先华^{1,2} 黄 微² 罗庆洲³ 刘顺喜⁴

(1 杭州师范大学遥感与地球科学研究院, 杭州市下沙学林街 16 号, 310036)

(2 上海大学遥感与空间信息科学研究中心, 上海市延长路 149 号, 200072)

(3 南京信息工程大学遥感学院, 南京市宁六路 219 号, 210044)

(4 中国土地勘测规划院, 北京市西城区冠英园西区 37 号, 100035)

摘 要: 研究了利用月球表面的数字高程模型和对应的卫星影像; 分析了遥感图像像元亮度值与光辐射照度、月面地形(像元地面坡度、坡向)之间的定量关系; 研究了月面遥感数字图像地形辐射改正的原理方法并实现月面遥感数字图像的地形辐射改正, 生成无阴影正射月表遥感图像。

关键词: 月球表面; 遥感图像; 地形辐射改正; 阴影消除

中图法分类号: P237.3

在对月探测中, 月表遥感影像所表现出的月表物质和矿产的光谱特征是探测月表物质特性、成分以及月球地形地貌的重要信息来源^[1]。然而, 由于月球表面地形起伏, 引起遥感图像像元与太阳相对位置和几何取向的变化, 导致像元坡面上太阳辐射照度变化, 改变了月球表面上遥感数字图像的像元亮度值。这便是地形对月球表面遥感数字图像的影响, 该影响改变了月球表面遥感图像获取的地物光谱及射率的真实信息, 进而影响了遥感数字图像的质量和定量研究的精度。消除地形对月球表面遥感数字图像的影响, 特别是月球表面山体阴影的消除及其信息恢复, 是月球表面遥感数字图像处理与深入应用中尚未解决的难题。

当前, 遥感图像地形辐射改正的方法在对地探测中已经得到了广泛的应用, 许多学者都提出各种地形改正的方法^[2-4]。归纳起来, 地形对遥感图像的影响主要包括太阳直射、散射和邻坡反射辐射^[4,5]。与地球相比, 月球表面没有大气, 遥感图像不存在大气影响。月球表面遥感图像像元亮度值由太阳直射光辐射亮度值和邻坡反射辐射亮度值两部分组成。本文在月球表面满足朗伯假定的条件下, 将对地探测中“遥感图像地形辐射改正”的概念引入月球表面遥感数字图像处理之中,

研究遥感图像像元亮度值与像元的太阳辐射照度、月球表面地形(地面坡度、坡向和高度)之间的定量关系; 研究月球表面遥感数字图像地形改正的原理方法并使用计算机技术实现月球表面遥感数字图像的地形改正, 生成真正的遥感数字正射图像。

1 月球表面遥感图像地形改正原理

1.1 月球表面遥感图像像元光辐射照度与亮度值
月球表面遥感图像像元地面光辐射照度主要由太阳直射光辐射照度和邻坡反射辐射光照度两部分组成:

$$E_{ij} = E_{sj} + E_{nj} \quad (1)$$

式中, E_{ij} 、 E_{sj} 和 E_{nj} 分别为月球表面遥感图像像元地面的总光辐射照度、太阳直射光光照度分量和邻坡反射光照度分量。

对应地, 月球表面遥感图像像元亮度值主要由两部分组成, 即太阳直射光分量亮度值和邻坡反射分量亮度值:

$$DN_{ij} = DN_{sj} + DN_{nj} = K \cdot R_{ij} \cdot E_{ij} / \pi = K \cdot R_{ij} \cdot (E_{sj} + E_{nj}) / \pi \quad (2)$$

式中, DN_{ij} 、 DN_{sj} 、 DN_{nj} 分别为月球表面遥感图像

收稿日期: 2010-07-20。

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(4997105, 40771145); 国家教育部博士点专项基金资助项目(20070269010); 国家科技部公益性行业科研专项基金资助项目(GYHY20070628); 上海市教育委员会重点学科建设资助项目(J50104)。

像元亮度值、太阳直射光辐射遥感分量和邻坡反射辐射遥感分量; R_{ij} 为目标像元的反射率; K 为传感器增益系数。

1.2 月球表面遥感图像像元的太阳直射辐射计算

像元在坡面上的太阳直射光辐射照度 E_{sj} 与水平面上太阳直射光辐射照度 E'_{sj} 有如下关系式:

$$E_{sj} = E'_{sj} \cdot F_{ij} \tag{3}$$

式中, F_{ij} 为太阳直射光的地形改正系数。如图 1 所示, θ_j 为太阳高度角; α_j 为像元坡度角; ω_j 是像元坡向角 A_{ij} 与太阳方位角 AL_{ij} 之差的绝对值, 即

$$\omega_j = |AL_{ij} - A_{ij}| \tag{4}$$

式中, α_j 和 A_{ij} 可以从相应的 DEM 中获得; θ_j 和 AL_{ij} 可以根据遥感图像中星下点的信息计算得到。因此, 可以计算 E_{sj} 与 E'_{sj} 的比例系数 F_{ij} 为^[6-8]:

$$F_{ij} = 1 - \tan\alpha_j \cot\theta_j \cos\omega_j \tag{5}$$

设 DN'_{sj} 为像元在水平地表的亮度值, 则与坡面上像元 DN_{sj} 存在如下关系:

$$DN_{sj} = DN'_{sj} \cdot F_{ij} = DN'_{sj} \cdot \left(1 - \tan\alpha_j \cot\theta_j \cos\omega_j\right) \tag{6}$$

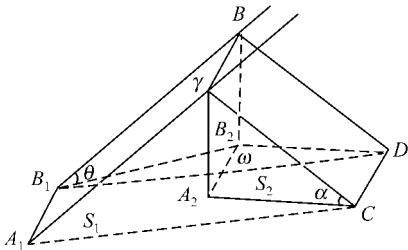


图 1 太阳直射光的地形改正系数

Fig. 1 Topographic Correction Coefficient of Solar Direct Radiance

1.3 月球表面遥感图像像元地面邻坡反射辐射计算

由于起伏地表的遮挡, 整个研究区域内仅有部分像元的反射光到达目标像元 P_{ij} 。如图 2 所示, 在某一方向的地形剖面上, 目标像元 P_{ij} 接收的邻坡反射辐射的范围仅在 AB 区域内。其余的点由于地形遮挡, 其反射光无法到达目标像元 P_{ij} 。若 DEM 上任一点其反射辐射欲达到目标像元, 则应满足下述条件: 该点与目标像元点所成高度角 h_k 应比该点到目标像元连线上所有点与目标像元点所成的高度角都要大^[6], 即 $h_k > h_i$ ($i = 1, 2, \dots, k-1$)。其中, h_i 是反射点与目标像元点连线上第 i 个点与目标像元点所成的高度角:

$$\tan h_i = (Z_i - Z_p) / S_i \tag{7}$$

$$h_i = \arctan[(Z_i - Z_p) / S_i] \tag{8}$$

在 DEM 上逐点进行上述计算和判断便可将该区域上所有反射辐射能够达到目标像元点 P_{ij}

的点确定出来。

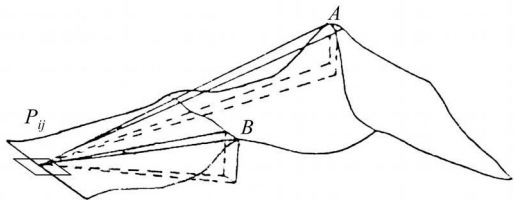


图 2 目标点接收的山地反射辐射

Fig. 2 Topographic Adjacent Radiance Received by Terrain

目标像元 P_{ij} 与某一邻坡反射点 P_{kl} 之间所成的立体角 Ω_{kl} 计算公式为:

$$\Omega_{kl} = (S \cdot \cos\beta_{kl}) / d_{kl}^2 \tag{9}$$

式中, S 为像元面积, β_{kl} 为邻坡反射点 P_{kl} 的入射光线与目标坡面像元 P_{ij} 法向量的夹角, d_{kl} 为邻坡反射点 P_{kl} 到坡面像元 P_{ij} 的距离。

P_{ij} 点的邻坡反射辐射照度为所有能够到达 P_{ij} 点的反射点作用之和^[5,7]:

$$E_{rij} = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N \Phi_{kl} / S = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N L_{kl} \cdot S \cos\theta_{kl} \cdot \Omega_{kl} / S = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N DN_{kl} \cdot \cos\theta_{kl} \cos\beta_{kl} / d_{kl}^2 \tag{10}$$

在对应数字地形图上, β_{kl} 可以方便地通过计算 $P_{kl}P_{ij}$ 连线(两点式)与像元坡面 P_{ij} 及相邻两点决定的法线(点法式)的两直线交角得到, θ_{kl} 可同理求得。

设 R_{ij} 为目标像元的反射率, 则邻坡反射分量亮度值可以表示为:

$$DN_{rij} = K \cdot R_{ij} \cdot E_{rij} / \pi \tag{11}$$

1.4 遥感数字图像中的阴影判别

本文利用与遥感图像匹配的 DEM 和光照方位参数进行遥感图像的阴影判断, 其判别原理如图 3 所示。对任意一个待判别像元, 按照光线入射反方向进行搜索, 逐点计算待判别像元与前方像元所构成的地面高度角 H_{ij} 。如果该角度大于太阳高度角 θ_j , 则像元为阴影; 否则为非阴影像元。其中, 高度角的计算公式为:

$$\tan H_{ij} = (h_{KL} - h_{ij}) / S_{KL} \tag{12}$$

式中, h_{KL} 和 h_{ij} 分别为前方像元和待判别像元的高程; S_{KL} 为这两点间的直线距离。

1.5 月表目标非阴影像元反射率反演

在月球表面遥感图像中, 非阴影像元的反射率采用迭代算法来反演计算, 并逐步逼近其真值。当前像元的 DN 值被一次性扣除环境照度影响后, 剩下的仅仅是太阳直射照度遥感值的近似值。

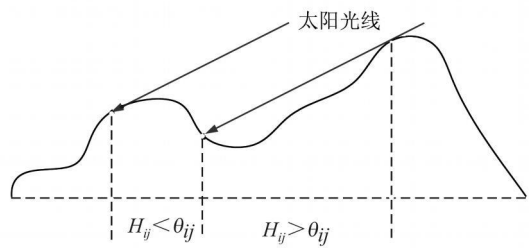


图 3 阴影的判别
Fig.3 Judgement of Shadow

因为每次反演得到的地面反射率都是近似值(第一次反演得到初始像元地面反射率必须假定像元遥感值等于太阳直射光遥感值:环境反射照度为 0),需要迭代逐次逼近其(反射率和环境反射照度(遥感值))真值。

由于非阴影像元上太阳直射光照度大大高于邻坡反射辐射照度,首先假设非阴影像元仅获得太阳直射光照度,不考虑邻坡反射辐射,来进行地形改正反演非阴影像元的反射率 R_{ij}^0 。然后,利用经过直射辐射地形校正后的反射率计算目标像元的邻坡反射亮度值。将邻坡反射亮度值从目标像元总亮度值中除去,再重复进行地形辐射改正,反演目标像元的反射率 R_{ij}^m ,直到反射率值的变化量逼近某一很小的常数。其反演流程图如图 4 所示。

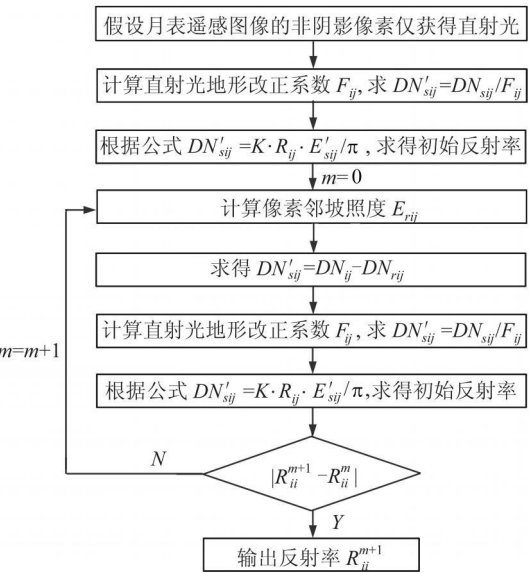


图 4 月表像元反射率反演的流程图
Fig. 4 Flow Chart of Reflectance Inversion of Lunar Remote Sensing Images

理论上,距离的范围取得越大,当前像元坡面上环境(反射)照度越大,像元反射分量遥感值越大。但是,由于距离越大,反射像元对当前像元(所成立体角越小)的反射照度贡献越小,以至于增加距离范围像元坡面上环境照度不足以引起像

元遥感值的变化(传感器无法检出),这时距离的范围才是合适的。这个合适的距离与当前像元的地形环境、周围像元地面反射率、传感器灵敏度以及成像瞬间的太阳高度角、方位角等因素有关。当其他因素一定时,最佳距离范围主要与当前像元所处的地形环境有关:地面平坦、简单,距离范围大;反之则反。

1.6 月球表面遥感图像地形改正

月球表面遥感图像包括非阴影像元和阴影像元。在地形改正过程中,本文分别对两种像元采用不同的方法进行改正。

对于非阴影像元,辐射地形校正后的像元亮度值 DN'_{ij} 为:

$$DN'_{ij} = DN'_{sij} = \frac{DN_{sij}}{F_{ij}} = \frac{DN_{ij} - DN_{rij}}{F_{ij}} \tag{13}$$

对于阴影像元,由于缺乏太阳直射光照,像元的亮度值是由邻坡反射辐射造成的,则阴影像元的反射率为:

$$R_{ij} = \pi DN_{ij} / KE_{rij} \tag{14}$$

当把阴影像元校正到水平地表时,其接收的太阳直射辐射为水平面上太阳直射光辐射照度 E'_{sij} :

$$E'_{sij} = E_0 \sin \theta_{ij}$$

式中, E_0 为月球表面的太阳常数。

因此,校正后的阴影像元亮度值为:

$$DN'_{ij} = KR'_{ij} E'_{sij} / \pi \tag{15}$$

对于阴影中亮度值很小、甚至近似为 0 的像元(太阳光经过月面多次反射、吸收、衰减,交叉反射辐射照度很小,阴影像元月面反射信号很弱,传感器无法检出),本文提出了一个近似的替代方案:可以简单地用地形校正后的邻近同类像元(根据热红外或微波特性判断)的亮度值替代,以完成月面遥感数字图像的该类地形阴影消除和信息恢复。

综上所述,可以将月球遥感图像中每个像元进行地形改正,生成无阴影的水平正射遥感图像。

2 实例及分析

本文选取了月球表面的一块真实影像进行了实验,所有实验算法均基于 VC++ 语言开发完成。图 5(a) 为 1994 年美国 Clementine 探月航天器获取的月表近红外影像,图 5(b) 为对应的 DEM 数据,其空间分辨率均为 1 000 m(<http://astrogeology.usgs.gov/SolarSystem/Earth/Moon/>)。从图 5(a) 可以看出,该地区分布的典型地形类型

为环形山。该区域地形影响明显,阴影区域较多。利用 DEM 数据可以计算太阳直射光地形改正系数,如图 5(c)所示。直射光改正系数的分布规律与月表影像一致:缺乏光照的地区,直射光改正系数小;光照充足的地区,直射光改正系数大。给定水平面上太阳辐射为一常数,利用上述月球表面遥感图像的地形改正方法,可以得到月球表面水平无阴影遥感图像,结果如图 5(d)所示。可以看出,本文提出的地形改正方法能够很好地消除月表影像的阴影,充分恢复月表影像的反射/光谱特征。同时我们发现,在环形山边缘地区存在校正不足的现象,即部分边缘阴影无法恢复,这主要是由于 DEM 数据和影像匹配或 DEM 数据采样存在误差以及少数地形阴影中的遥感数值为 0(太阳光经过月面多次反射、吸收、衰减,交叉反射辐射照度很小,阴影像元月面反射信号很弱,传感器无法检出),同时又缺乏对应的微波和热红外遥感资料,无法用同类地物像元遥感值替代所造成的。

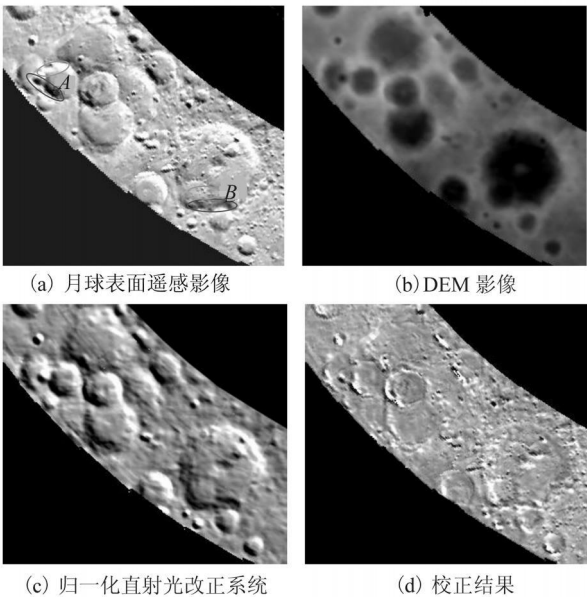


图 5 月球遥感影像及其地形辐射改正结果
Fig.5 Raw Lunar Image and Its Corrected Result

为了更好地分析校正结果,笔者在月球影像上选取了分别位于阴坡和阳坡的邻近像元的遥感值进行了定量分析,选取的区域如图 5(a)所示的 A、B 区域。其中,阴/阳坡面可以根据当时太阳入射光线的方位(太阳天顶角 35° ,方位角 22°)进行判断。由于无法探测月球表面真实的地物覆盖情况,对于邻近的阴、阳坡面的像元,可以假定属于同一类地物,它们的像元值差异主要是由于地表起伏所造成的。从表 1 可以看出,经过地形改正后,分别位于阴、阳坡面的像元遥感值基本趋

近于一致,表明本文提出的校正方法能够有效地消除地形对月表影响的影响。

表 1 校正前后阴、阳坡影像像元值比较
Tab.1 Comparison of Pixels Values Before and After Correction

		坡度/rad	坡向/rad	F	像元值	
					校正前	校正后
区域 A	阴坡	0.17	0.44	0.39	48	145
	坡	0.32	1.12	0.26	44	154
		0.32	6.11	0.35	25	139
	阳坡	0.13	4.61	0.61	198	153
	坡	0.37	3.84	0.81	255	133
区域 B	阴坡	0.22	0.79	0.33	41	149
	坡	0.18	0.49	0.38	46	133
		0.04	3.95	0.56	159	148
	阳坡	0.35	3.54	0.77	253	131
	坡	0.28	3.27	0.69	255	148

3 结 语

经过地形改正的月球表面遥感数字图像可视在月球表面的太阳光谱照度各点相同、地形状况各点一致的最佳成像条件下所能得到的月球表面遥感数字图像。从理论上讲这样的月球表面遥感数字图像应该是真正的月球表面遥感正射图像。这样数字图像是对应月球表面上太阳光谱照度无差异成像的结果,最大化地消除因位置(月球经纬度)和地形对月球表面遥感数字图像的影响,是对应月球表面波谱响应的结果。它充分、突出地表达了地物波谱特性,提高了探测器对月球表面物质(性质)的系统探测能力,并改善月球表面遥感数字图像的质量。

参 考 文 献

[1] Zou Yongliao, Liu Jianzhong, Liu Jianjun, et al. Reflectance Spectral Characteristics of Lunar Surface Materials. Chin J Astron Astrophys, 2004, 4 (1): 97-104

[2] 李先华, 兰立波, 喻歌农, 等. 卫星遥感数字图像的地面辐射改正研究[J]. 遥感技术与应用, 1995, 10 (1): 1-9

[3] Riano D, Chuvieco E, Salas J, et al. Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat TM Data for Mapping Vegetation Types (2003) [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(5): 1 056-1 061

[4] Stefan S, Klaus I. A Physically-Based Modal to Correct Atmospheric and Illumination Effects in Optical Satellite Data of Rugged Terrain[J]. Geosci

ence and Remote Sensing, 1997(35): 708-717

[5] Proy C, Tanre D, Deschamps P. Evaluation of Topographic Effects in Remotely Sensed Data[J]. Remote Sens. Environ, 1989(30): 21-32

[6] 李先华, 黄雪礁, 池天河, 等. 卫星遥感数据的地表直射光辐射计算与改正[J]. 遥感技术与应用, 1993, 8(2): 1-9

[7] 李先华, 黄雪礁, 池天河等. 卫星遥感数据的山地地表反射辐射计算与改正[C]. 中科院遥感与地理信息系统首届青年学术研讨会, 北京, 1991

[8] 李先华. 遥感信息的地形影响与改正[J]. 测绘学报, 1986, 15(2): 102-109

[9] Feng Jilu, Rivard B, Sanchez A. The Topographic Normalization of Hyperspectral Data: Implications for the Selection of Spectral End members and Lithologic Mapping[J]. Remote Sensing Environment, 2003, 85(2): 221-231

[10] Chuvieco R D, Salas E, Aguado J. Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat TM Data for Mapping Vegetation Types[J]. J Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2003, 41(5): 1 056-1 061

第一作者简介: 李先华, 研究员, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 遥感理论基础研究、遥感图像定量解析、遥感对地探测等。

E-mail: lxhcni@yahoo.com.cn

Research of Radiant Topographic Correction Theory for Lunar Surface Remote Sensing Imageries

LI Xianhua^{1,2} H UANG Wei² LUO Qingz hou³ LI UShunxi⁴

(1 Institute of Remote Sensing and Earth Science, Hangzhou Normal University, 16 Xiashaxuelin Street, Hangzhou 310036, China)
(2 Research Center of Remote Sensing and Spatial Information Science, Shanghai University, 149 Yanchang Road, Shanghai 200072, China)
(3 School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, 219 Ningliu Road, Nanjing 210044, China)
(4 China Land Surveying and Planning, 37 West Guanyingyuan, Xicheng District, Beijing 100035, China)

Abstract: In lunar remote sensing imageries, irregular terrain causes the change of relative orientation between image pixels and solar radiance. It is topographic influences that lead to various solar radiance received by slope surface, further to various values of pixels in lunar remote sensing imageries. Topographic correction of lunar remote sensing image is to produce orthorectification remote sensing image by correcting the values of pixels on slope surface to that on horizontal surface in the same solar condition(with same incidence/ extend angles and distances) . In this paper, the theory of topographic correction of lunar remote sensing imageries has been proposed, and the relationship between values of pixels and terrain (including slope and aspect) has been quantitatively analyzed. An experiment of lunar remote sensing data demonstrated the satisfied correction results.

Key words: lunar surface; remote sensing image; topographic correction; shadow removal

About the first author: LI Xianhua, professor, Ph. D supervisor, majors in remote sensing image processing, etc.
E-mail: lxhcni@yahoo.com.cn

下期主要内容预告

- ▶ Trip 软件非差几何法精密定轨精度分析

▶ 基于边缘特征点聚类分析的 RHF 圆形目标快速检测

▶ 简单地形特征建立 DEM 的 HASM 方法

▶ 基于 SIFT 与粗差探测的 SAR 影像配准

▶ 前视双基地 SAR CS 成像算法
- 张小红, 等

方圣辉, 等

宋敦江, 等

史磊, 等

蔡复清, 等