

文章编号 1004-924X(2019)08-1819-09

星载成像仪观月数据提取和辐照度转换方法研究

吴荣华^{1,2,3}, 张 鹏^{3*}, 郑小兵¹, 胡秀清³, 徐 娜³, 张 璐³, 乔延利¹

(1. 中国科学院 合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 为了实现星载成像仪的月球绝对辐射定标, 在轨对月观测数据的预处理环节需要完成两方面的任务: 一是从全部的冷空视场数据中, 准确辨识出月亮进入冷空视场的时刻; 二是将对月观测原始计数值换算为全圆盘辐照度, 以便与月球辐射模型比较。具体到中分辨率光谱成像仪(MERSI), 本文从 MERSI 观测模式出发构建出月亮进入冷空视场的阈值辨识模型。根据 MERSI 对月观测的成像几何和定标公式, 分别以单探元多帧扫描图像和多探元单帧扫描图像为基础, 构建出月球全圆盘辐照度算法。结果显示, 阈值辨识模型可以实现从平均约 30 d 的观测数据中, 准确标记出约 1 min 的月亮图像数据。两种计算辐照度的方法得到的辐照度平均差异约 0.9%。所提方法可以将原始的对月观测数据计算为辐照度值, 为进一步的绝对辐射定标及误差分析提供基础, 同时, 也可以为类似的成像遥感器的月亮定标工作提供参考。

关键词: 月球定标; 中分辨率光谱成像仪; 星载成像仪; 月球辐照度; 过采样

中图分类号: TP73 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20192708.1819

Data collection and irradiance conversion of lunar observation for MERSI

WU Rong-hua^{1,2,3}, ZHANG Peng^{3*}, ZHENG Xiao-bing¹,

HU Xiu-qing³, XU Na³, ZHANG Lu³, QIAO Yan-li¹

(1. *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081, China)*

* *Corresponding author, E-mail: zhangp@cma.gov.cn*

Abstract: Lunar calibration is an effective method for visible and near-infrared spectrum remote sensors. Original lunar observation data should be pre-processed into lunar full disk irradiance in order to compare them with a lunar radiation model. This paper describes the pre-processing of lunar data of the MERSI on the FY-3D satellite. The data pre-processing includes two steps. First, the lunar observation data are identified from the massive space view data. Then, the identified lunar original digital count is converted into full disk irradiance. Based on the MERSI observation mode, the lunar zenith and azimuth in the instrument reference coordinate system are used to construct a threshold

收稿日期: 2018-12-27; 修订日期: 2019-02-22.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(No. 2018YFB0504900); 国家自然科学基金资助项目(No. 41471303)

model. When the zenith and azimuth meet the threshold conditions, the data are identified as lunar image. According to MERSI's imaging geometry and calibration formula, the lunar full disk irradiance can be calculated from two different lunar images. Irradiance from a single-detector multi-scan image needs to be corrected for the over-sample factor, and irradiance from a multi-detector single-scan image needs to be corrected for the radiation response difference between detectors. Based on this method, about 1 minute of lunar observation data among 30 days can be found and identified. The results show that the average difference of irradiance between the two methods is about 0.9%. The pre-processing method presented in this paper can find the original lunar observation data and convert them to full disk irradiance value, which provides a basis for further absolute radiation calibration and error analysis. It can also provide a reference for lunar calibration of other similar remote sensors.

Key words: lunar calibration; Medium Resolution Spectral Imager (MERSI); imager; lunar irradiate; over sample

1 引言

月亮反射特性稳定、亮度低,适合作为低亮度的辐射定标基准源;同时,星载成像仪观测月亮时,光路不经过大气层,避免了大气散射和吸收的影响,使月亮适用于遥感器的在轨辐射定标^[1]。我国极轨气象卫星风云三号(FY-3)的主要载荷之一,中分辨率光谱成像仪(Medium Resolution Spectral Imager, MERSI)^[2-3]可以通过其冷空视场观测到完整的月亮,从而使月亮定标具备了现实基础。国际上,同类遥感器,如 MODIS^[4]和 SeaWiFS^[5]等极轨中分辨率对地成像仪器,已开展了大量的月亮定标研究。特别是 SeaWiFS,月亮定标是其主要的辐射定标方式,保证了其长时间对地观测数据的精度。为了协调各国研究人员在月亮定标领域的工作,空基全球交叉定标系统组织(Global Space-based Inter-Calibration System, GSICS)于 2014 年 12 月在欧洲卫星气象中心(European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, EUMETSAT)总部组织召开月亮定标研习会^[6]。

国内方面,陈林等^[7]利用卫星轨道根数结合轨道预报算法计算出月亮出现在风云二号成像仪图像视场的时间,利用红外通道的亮温,提取出月亮图像数据。通过对比月球辐射模型实现可见近红外通道的辐射响应定标。月亮定标结果与深对流云方法得到的定标结果相互印证。郭强等^[8]在红外波段,特别是水汽吸收波段,利用月亮定标改善了水汽吸收通道对低入射能量的辐射响应定标精度。张璐等在月球辐射模型方面,比较了多种

模型间的差异,并改进了模型近红外谱段的精度^[9-10]。吴荣华等^[11]基于 FY-3C/MERSI 的对月观测,利用月亮辐照度比值,依据数据特征,在不引入月亮辐射模型的情况下,实现了通道辐射响应的衰减跟踪。但是,由于没有引入月球辐射基准模型, MERSI 尚未实现月球的绝对定标。风云三号 D 星(FY-3D)上的中分辨率光谱成像仪^[12]在继承之前三颗星(FY-3A/3B/3C)载荷的功能基础上,冷空采样点扩大了一倍,对月观测能量进一步提升。全球二氧化碳监测星^[13]、高分六号、风云四号^[14]等卫星等均设计了星上对月观测功能,对于如何利用这些卫星的对月观测数据实现星上的绝对辐射定标,是十分现实和紧迫的问题。

为了实现月亮绝对辐射定标,星载成像仪的对月观测数据的预处理是重要的工作基础。预处理工作需要解决两个主要的问题:约 30 d 的冷空观测数据中准确判识并提取出约 1 min 的对月观测数据;将原始对月观测数据转换为月球辐照度观测值。本文首先介绍 MERSI 的观测模式,之后介绍构建对月观测数据判识窗口模型,最后给出计算月球辐照度的两种方法并比较结果。

2 MERSI 观测模式及对月观测数据判识

MERSI 采用长线列跨轨多元并扫方式^[15],提供 1 000 m 和 250 m 两种空间分辨率的遥感图像,1 000 m 通道为 10 元并扫,250 m 通道为 40 元并扫。单次扫描中, MERSI 扫描镜依次扫描对地、定标器、黑体和冷空视场,分别获取 4 种观测模式数据,如图 1 所示。

对地观测视场为星下点 $\pm 55.1^\circ$,对地观测数据是 MERSI 的主要观测数据,用于后续量化应用。1 000 m 通道单次对地扫描(单帧)获取 2 048 个采样点,单帧图像大小为 $10 \times 2\,048$;相应地,250 m 通道单帧获取 8 192 个采样,单帧图像大小为 $40 \times 8\,192$ 。

定标器视场为星下点 90° 卫星前进方向左侧,获取 32 个采样数据(1 000 m 通道),定标器数据主要用于仪器的辐射响应衰减跟踪。黑体视场为星下点相反方向,获取 16 个采样数据(1 000 m 通道),主要用于红外通道的在轨实时定标。

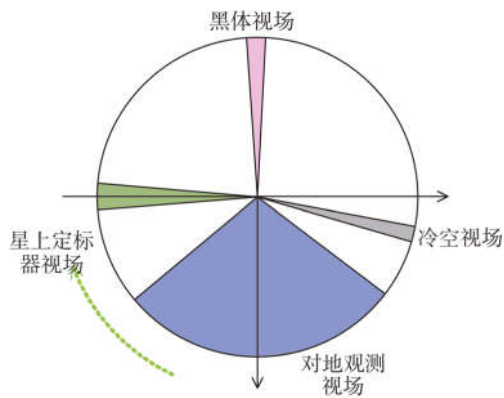


图 1 MERSI 观测模式

Fig. 1 MERSI observation mode

冷空视场(Space View, SV)位于星下点 69.5° 卫星前进方向右侧,获取 48 个采样数据(1 000 m 通道),用于获取实时的暗电流计数值。MERSI 的对月观测是通过冷空视场获取的。MERSI 冷空视场随着卫星围绕地球的运动,在空间中扫描成环面^[11],当月亮运行至该环面中时,MERSI 采集到对月观测数据。

不同于陈林等^[7]提取风云二号观月数据方法。MERSI 利用实时的 GPS 位置数据和姿态数据计算月球在仪器坐标系下的位置,通过冷空视场的覆盖范围确定月球是否进入冷空视场。相对于基于卫星轨道根数推算卫星轨道位置,以及未考虑实际姿态角度的预测方法,采用真实位置和姿态数据计算出的月亮天顶角和方位角,精度更高,错报漏报更少。因而不需要另外的补充方法进一步提取月球观测数据。

在仪器坐标系中,定义天顶角为距离星下点方向的角度,方位角为距离卫星前进方向的角度,则冷空视场的天顶角为 $(69.5^\circ \pm 1.65^\circ)$,方位角为 $(90.0^\circ \pm 0.34^\circ)$ 。当月球天顶角和方位角大小

在以上角度范围内时,可以判定为月球进入了冷空视场。

为了更精细地区分 MERSI 的月球观测图像是否是完整的月球圆盘,需要进一步的考虑月球的视张角订正。月球直径为 3 474.8 km,地月平均距离为 384 400 km,月球对地球的视张角约为 0.51° ,半张角约为 0.25° 。月亮进入冷空视场可以区分为月亮全部进入冷空视场、月亮部分进入冷空视场和月亮未进入冷空视场三种状态,如图 2 所示。以天顶角方向为例,冷空视场范围 $(67.85^\circ \sim 71.15^\circ)$,考虑到月球 0.25° 半张角,则月球全部进入视场的角度范围 $(68.1^\circ \sim 70.9^\circ)$ 。月球部分进入冷空视场的角度范围 $(67.6^\circ \sim 68.1^\circ)$, $(70.9^\circ \sim 71.4^\circ)$ 。同理可以得到方位角需满足的条件,具体见表 1 和表 2。方位角月球为 $(89.91^\circ \sim 90.09^\circ)$ 时,月亮完全进入冷空视场;当方位角 $(67.6^\circ \sim 68.1^\circ)$, $(70.9^\circ \sim 71.4^\circ)$ 时,月亮部分进入冷空视场;其他情况为月亮未进入冷空视场。只有月球天顶角和方位角同时满足全部进入冷空视场时,才可以得到月球的全圆盘图像。

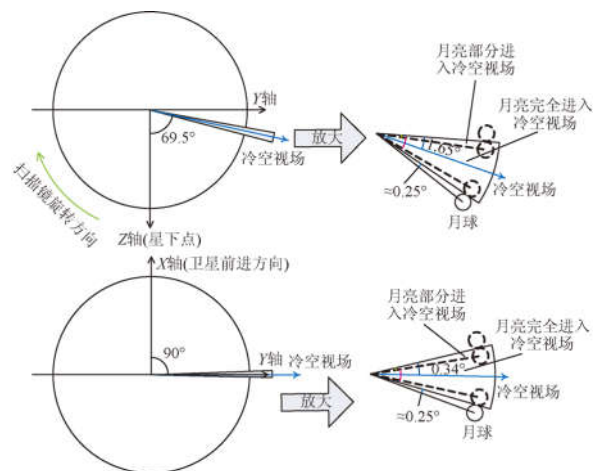


图 2 月球进入冷空视场示意图

Fig. 2 Space view range and moon

表 1 行方向月亮完整性判识表

Tab. 1 Judgment of Moon integrity in horizontal direction

冷空视场指向角	冷空视场半张角	月亮半张角	判识阈值	判识结果
69.5	-1.65	-0.25	67.6	部分进入
		0.25	68.1	
	1.65	-0.25	68.1	全部进入
		0.25	70.9	
		-0.25	70.9	部分进入
		0.25	71.4	

表 2 列方向月亮完整性场判识表

Tab. 2 Judgment of Moon integrity in vertical direction

冷空视场 指向角	冷空视场 半张角	月亮 半张角	判识 阈值	判识 结果
90.0	-0.34	-0.25	89.41	部分进入
		0.25	89.91	
		0.25	89.91	
	0.34	-0.25	90.09	全部进入
		-0.25	90.09	
		0.25	90.59	

根据上述判断阈值,计算出 2017-11-30 10:20 数据中存在对月观测数据。月亮天顶角和方位角数据如图 3。

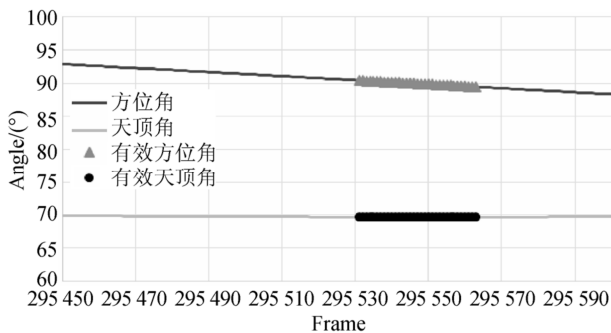


图 3 月亮天顶角与方位角及月亮标记结果

Fig. 3 Geometry relationship of the moon and FY-3D

根据阈值,扫描帧号:295531~295563 为满足条件的数据。以扫描帧号 295545 为中心,提取前后各 50 帧扫描数据组成有月待选数据,月亮图像如图 4。对月观测时,由于卫星和月亮的相对运动,月亮慢慢从卫星前进方向进入冷空视场图像中,达到最大后,慢慢移出图像。



图 4 冷空视场采集的月亮图像

Fig. 4 FY-3D MERSI First lunar image (band 1)

本方法可以从约 43 200 min(30 d)数据中精确提取出约 1 min 的对月观测数据,可以对月观测数据的处理更加自动化,减少错判漏判和人工干预。同时,本方法可以为其他在轨遥感器的对月观测数据提取提供参考。

3 月球辐照度观测值计算方法

3.1 单像素辐照度及暗电流计数值估算

MERSI 单像素的辐照度计算式为:

$$I = \omega L = \omega [k(DN - DC) E_s / \pi], \quad (1)$$

其中: I 为单像素的辐照度观测值, ω 为像元的空间立体张角,对于 250 m 分辨率通道,单像素的立体张角为 $\omega = 0.3 \text{ mrad} \times 0.3 \text{ mrad}$,对于 1 000 m 分辨率通道,单像素的立体张角为 $\omega = 1.2 \text{ mrad} \times 1.2 \text{ mrad}$; L 为单像素辐亮度, k 为 MERSI 的辐射定标斜率, DN 为像元的观测计数值, DC 为暗电流噪声计数值, E_s 为 MERSI 的通道太阳常数。

月亮是低反射率目标,其引起冷空视场观测计数值的变化量较小,因此,为了得到准确的由月亮能量引起的计数值变化,需要估算对月观测时的暗电流计数值。MERSI 的 SV 观测值存在波动,如图 5 上所示,图中为 2017-11-30 对月观测时通道 1 的 SV 计数值序列。波动的原因一方面可能是探测器温度变化引起的波动;另一方面可能受到未知来源的杂散光影响。在计算月亮辐照度时,应移除这些因素影响的暗电流值。

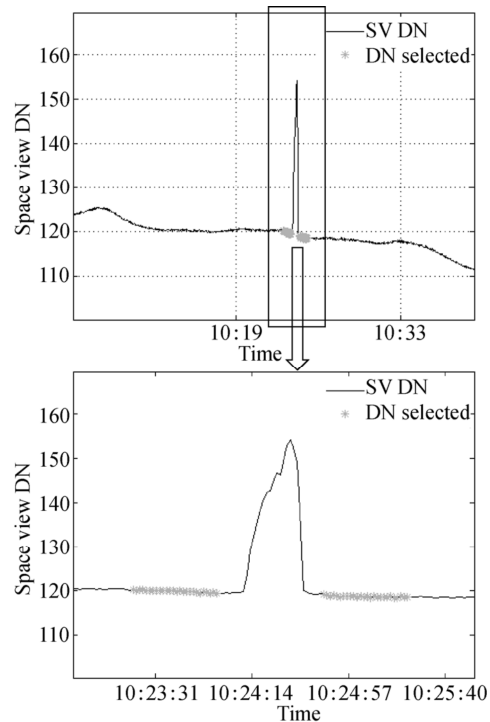


图 5 通道 1 的冷空计数值序列

Fig. 5 Space view DN of band 1

考虑到探测器温度和随机杂散光在短时间内不会剧烈变化,因此,选取对月观测前后,不受月亮影响的各 25 帧数据作为暗电流估算的数据,选取出的 DN(如图 5 所示),以平均值作为对月观测的暗电流计数值(DC),标准差作为 DC 的随机噪声,如式(2)和式(3)所示:

$$DC = \text{mean}(DN_{\text{selected}}), \quad (2)$$

$$\Delta DC = \text{std}(DN_{\text{selected}}). \quad (3)$$

由于月亮属于低亮度目标,其引起的计数值变化量与暗电流计数值数量级相当,因此 DN 的随机误差与暗电流计数值的随机误差相当。

月亮模板对于月亮辐照度计算十分重要,累积计算月亮像素的辐照度,可以抑制由于杂散光影响的非月亮像素而导致了辐照度偏高的情况,也使辐照度的序列更加稳定可靠。通过阈值法构建月亮模板:以月亮图像的最大计数值与暗电流计数值差的 10% 为阈值,大于阈值的标识为月亮像素(数值为 1),小于阈值的标识为非月亮像素(数值为 0),如式(4)所示:

$$\text{Mask}(DN) = \begin{cases} 1, & DN > 0.1(DN_{\text{max}} - DC) \\ 0, & DN < 0.1(DN_{\text{max}} - DC) \end{cases}. \quad (4)$$

构建逐探元月亮图像模板,对于单探元多帧图像(如图 8 所示)和多探元单帧图像采用相同的方法,均可获得月亮模板。

3.2 月球全圆盘辐照度

月亮全圆盘辐照度通过积分全部的月亮像元辐照度值得到,如式(5)所示:

$$I_{\text{moon}} = f_{\text{os}} \sum_{\text{moon}} I_{\text{pixel}}, \quad (5)$$

式中: I_{pixel} 为单像素辐照度, f_{os} 为过采样因子。对全部月亮像元取和,订正过采样影响,计算出月亮全圆盘辐照度 I_{moon} 。其中 f_{os} 存在两个方向的过采样影响,即扫描采样方向 f_{sample} 和图像行方向 f_{line} 组成。在设计上,扫描采样方向存在 27% 的重叠部分, $f_{\text{sample}} = (1 - 0.27) = 0.73$ 。而图像行方向的过采样因子计算则根据计算策略的不同存在差异,即 $f_{\text{os}} = f_{\text{sample}} \cdot f_{\text{line}} = 0.73 f_{\text{line}}$ 。月亮辐照度计算中可以分别单元多帧月亮图像和多元单帧月亮图像两种策略计算月球辐照度。

3.3 多探元单帧月亮图像与辐射归一化订正

MERSI 单帧图像也可以获取完整的对月观测图像。对于采样点数 48 个(1 km 通道),10 元并扫探测器可以在一帧冷空采样中,获取 $0.69^\circ \times 3.3^\circ$ 视场范围数据,完全可以覆盖月亮的全圆盘。

单帧图像需要解决的问题是多元辐射响应一致性问题。探元不一致导致月亮图像出现条纹,采用业务系统中的辐射响应归一化查找表,对各个探元数据逐一订正。图 6 为单帧的原始图像和处理后的图像,经过处理后的图像更加均匀,可以用于进一步计算月亮辐照度。

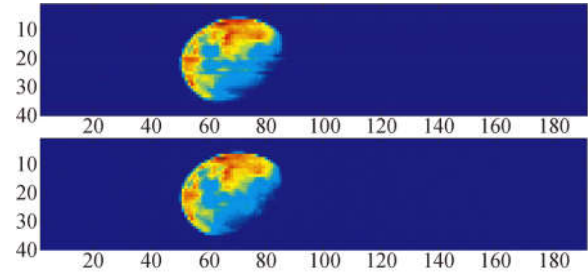


图 6 单帧月亮图像条纹订正效果(通道 1)

Fig. 6 One-Frame Moon image stripe correction (band 1)

对于查找表的误差,可以从其构建的过程分析得出。经验分布函数基于 MERSI 大数据量的对地观测样本,统计出各个探元码值的经验分布函数,如图 7(a)所示。利用等概率假设,以参考探元为基准,构建探元输出码值与参考探元输出码值的查找表,如图 7(b)所示。可见误差来源于两个环节:等概率假设和等概率对应码值。等概率假设中,由于是对地观测大样本数据,各个探元对地观测的经验分布函数差异可以忽略。由于存在截断误差,使得相同概率对应的查找表码值存在正负 1 个码值的误差。

经过业务系统辐射归一化后的图像,对地观测图像包括对月观测图像的条纹条带现象得到去除,数据质量得到提升。

对于单帧月亮图像,探测器阵列方向像元是紧密排列的,不存在过采样现象, $f_{\text{detector}} = 1$, 则 $f_{\text{os}} = 0.73$ 。

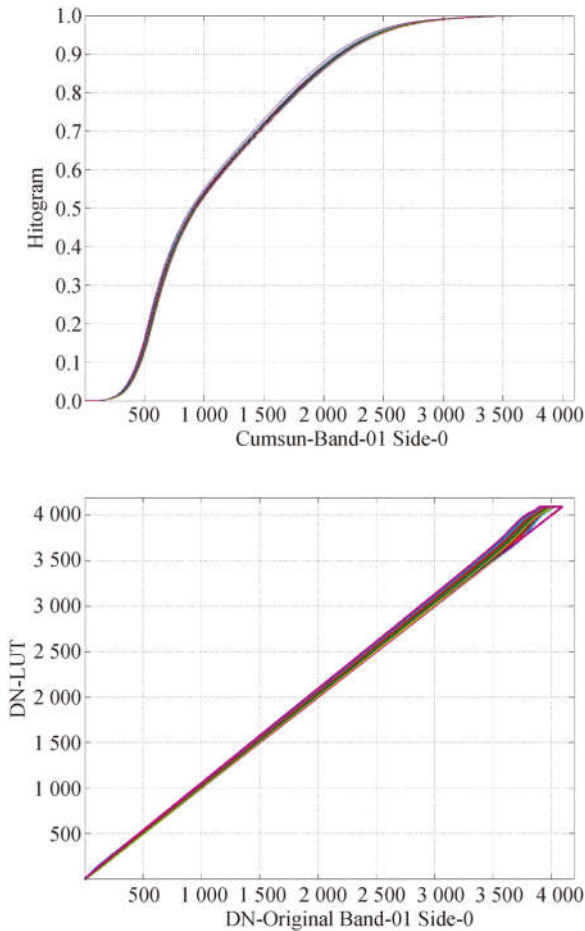


图 7 经验分布函数和探元辐射响应归一化查找表(通道 1)
Fig. 7 Empirical distribution function and look-up-table

3.4 单探元单行多帧月亮图像与过采样因子计算

对月观测过程中, MERSI 各个通道以相同的帧数完成月亮数据的采集。随着月亮的缓慢移动, 通道内每个探元均完成了一次对月完整扫描, 将探元逐帧数据抽取重新拼接为完整月亮图像。按照通道探测器阵列内探元数, 以固定的间隔抽取组成单探元的观测图像数据。对于 250 m 分辨率通道每 40 行抽取数据, 1 000 m 分辨率通道每 10 行, 单探元月亮图像如图 8 所示。

作为对地观测遥感器, 要求 MERSI 的对地观测帧间图像保持连续, 即地面像元尺寸 P (星下点) 和 MERSI 在两次扫描之间前进距离 d 相等。在对月观测时(如图 9 所示), 由于月亮距离卫星远大于卫星地面高度, 所以对月观测图像的 P 和 d 不再匹配。



图 8 单探元多帧月亮图像(2017-11-30 10:20)
Fig. 8 Moon image based on one-detector multi-frame data
(2017-11-30 10:20)

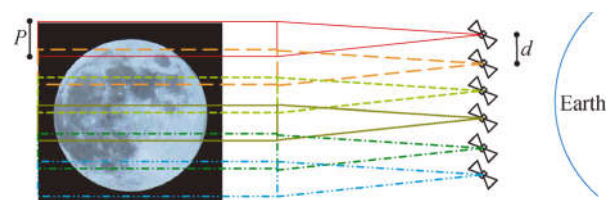


图 9 单探元成像及观测过采样示意图
Fig. 9 Over sample geometry

使用过采样因子描述 MERSI 扫描帧之间重复采样的情况。过采样因子通过 P 和 d 来计算, 描述这种对目标物的重复采样, 如式(6)所示:

$$f_{os} = P_{moon} / d_{moon}, \quad (6)$$

其中: f_{os} 为过采样因子, P_{moon} 为像元尺寸, d_{moon} 为卫星前进距离。

月表像元尺寸可以通过 MERSI 的瞬时视场角(IFOV)与卫星月亮的距离计算, 通过式(7)计算得到, 其中 θ 为 MERSI 的 IFOV, 1 km 通道为 1.2 mrad(250 m 通道为 0.3 mrad), $D_{Sat moon}$ 为实时的卫星月球距离:

$$P_{moon} = \sin \theta \cdot D_{Sat moon} \approx \theta \cdot D_{Sat moon}. \quad (7)$$

对于帧间卫星前进距离 d_{moon} , 可以通过 MERSI 扫描周期(1.5 s)和对应的速度计算得到, 如式(8)所示, 式中 ΔT 为 MERSI 扫描周期(1.5 s), V_{track} 为在月表上卫星沿轨前进方向的相

对速度:

$$d_{\text{moon}} = \Delta T \cdot V_{\text{track}}, \quad (8)$$

对月成像的几何关系如图 10 所示,相对速度可以通过对月成像的几何关系推算。图中 MERSI 在月表上沿轨前进的速度分量,其由两部分构成,通过式(9)计算,一部分为卫星速度在月表的投影速度,按照几何的相似性可以知道其计算如式(10)所示,式中 r_{ar} 为圆环的半径, r_{MERSI} 为 MERSI 的轨道半径, V_{MERSI} 为 MERSI 的运行瞬时速率。另一部分为月球速度在卫星前进方向的速度分量, $V_{\text{Moon T}}$ 为月球速度在卫星前进方向的速度分量,如式(11)所示:

$$V_{\text{track}} = |V_P| + V_{\text{Moon T}}, \quad (9)$$

$$V_P = -\frac{r_{\text{ar}}}{r_{\text{MERSI}}} V_{\text{MERSI}}, \quad (10)$$

$$V_{\text{Moon T}} = V_{\text{Moon}} \cdot \frac{V_P}{|V_P|}. \quad (11)$$

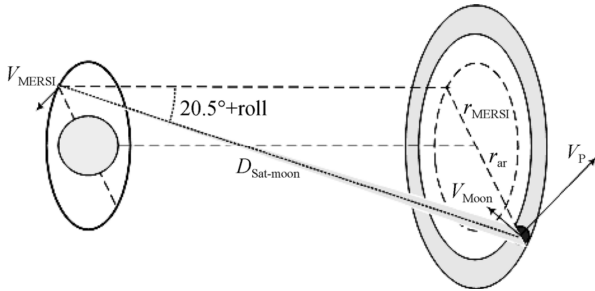


图 10 星月空间位置关系

Fig. 10 Geometry relationship of the moon and MERSI

大圆环半径的计算如图 10 所示,由于 MERSI 在距离星下点 69.5 方向采集数据,在实时观测中卫星姿态在滚动方向存在微弱的滚动角,即实际的角度应为 $20.5 + \text{roll}$,因此大圆环的半径可以通过式(12)计算:

$$r_{\text{ar}} = D_{\text{Sat moon}} \sin(20.5 + \text{roll}) - r_{\text{MERSI}}. \quad (12)$$

3.5 辐照度观测值计算结果

通过上述计算过程,可以得到月亮的辐照度光谱(如图 11 所示)。月球辐照度光谱与太阳光谱相似,在 $0.55 \mu\text{m}$ 附件出现最大值,在短波和长波方向辐照度逐渐减小。两种计算方法得到的辐照度值形状一致,但存在微弱差异,平均相对偏差约 0.91%。

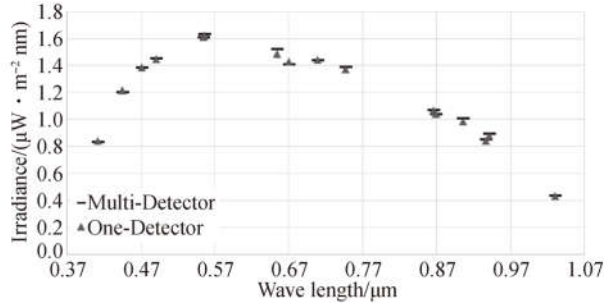


图 11 月球辐照度光谱观测值

Fig. 11 Observation of Lunar irradiate spectrum

MERSI 在月球上的像元尺寸 (P_{moon}) 约为: 448 km(地月平均距离为 384 400 km, 1 km 通道视张角 1.2 mrad), 而卫星在两次扫描之间相对于月球行进的距离 (d_{moon}) 约为 191 km(月亮垂直进入圆环面)。根据上式计算出的过采样因子: 0.580 6(@250 m 通道), 2.322 3(@1 000 m 通道), 过采样因子小于 1, 意味着 250 m 通道单探元多帧月亮图像存在欠采样现象, 以此计算辐照度会引起较大的随机误差。

另外, 过采样的计算过程显示, 过采样因子计算依赖于卫星的瞬时速度, 而计算结果描述了遥感器在一段时间对月观测的平均过采样程度, 因此, 利用瞬时数据描述一段时间的平均过采样存在一定的随机误差。在对月观测期间, 1 000 m 通道过采样因子的变化范围在 2.322 18~2.322 60 之间, 因此, 相对误差约 0.018%, 可以忽略。

单探元多帧辐照度与多探元单帧辐照度相比, 在时间序列的稳定性上略差。因此, 建议采用多元单帧的方法计算月球辐照度, 用于后续的绝对辐射定标等处理。

3.6 讨论

本研究中的多探元单帧图像方法, 主要解决多探元辐射响应不一致问题, 避免过采样因子的计算; 单探元多帧图像方法刚好相反, 避免多探元辐射响应不一致的处理, 主要解决过采样因子的理论计算问题。

为了解决 250 m 通道单探元多帧图像的欠采样问题, 可以取 2 个相邻行的像元, 在不同帧间抽取图像, 组合成月球完整图像。通过这种处理, 可以增加图像的过采样因子, 解决欠采样问题; 但

是,同时也需要处理相邻 2 个探元辐射响应的不一致问题。

取 2 个相邻行像元的处理方法是本研究中两种月球图像处理方法的组合。可以进一步扩展为选取不同数量的相邻行帧间数据,对最后计算结果的影响;是否可以联合若干隔行帧间数据组成月球图像对最后计算结果的影响;以及是否存在最优化组合策略等,这些问题都值得开展进一步的专题研究。

4 结 论

本文分析了 MERSI 月亮观测几何,根据 MERSI 的冷空采样原理,构造了精确标识出冷空对月观测帧号的方法,使得对月观测数据的处理更加自动化。同时,可以为其他在轨遥感器的对月观测数据提取提供参考。

参考文献:

- [1] KIEFFER H H, WILDEY R L. Establishing the moon as a spectral radiance standard [J]. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 1996, 13 (2): 360-375.
- [2] ZHANG P, YANG J, DONG C H, *et al.*. General introduction on payloads, ground segment and data application of Fengyun 3A [J]. *Frontiers of Earth Science in China*, 2009, 3: 367-373.
- [3] YANG J, ZHANG P, LU N M, *et al.*. Improvements on global meteorological observations from the current Fengyun 3 satellites and beyond [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2012, 5 (3): 251-265.
- [4] SUN J Q, XIONG X X, BARNES W L, *et al.*. MODIS reflective solar bands on-orbit lunar calibration [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(7): 2383-2393.
- [5] EPLEE R E, BARNES R A, PATT F S, *et al.*. SeaWiFS lunar calibration methodology after six years on orbit [C]. *Earth Observing Systems IX, ed. W. L. Barnes and J. J. Butler*, 2004(5542):1-13.
- [6] WAGNER S C, HEWISON T, STONE T, *et al.*. A summary of the joint GSICS-CEOS/IVOS lunar calibration workshop: moving towards intercalibration using the Moon as a transfer target [C]. *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIX*, 2015.

对于单帧多探元对月观测图像,利用归一化查找表的方法,将全部探元的观测计数值映射到参考探元上,月亮图像的条纹现象得到消除,这是多探元同时获取月亮图像的重要处理环节。

依据 MERSI 的观测原理,卫星瞬时位置速度和月亮位置速度,推导出对月观测过采样因子的计算方法。通过计算发现,对于 250 m 分辨率的通道过采样因子约为 0.580 6,单探元多帧对月观测图像存在欠采样现象。两种辐照度的计算方法得到的结果平均相对偏差约为 0.91%。建议采用多探元单帧图像辐照度计算结果用于后续的绝对辐射定标等处理。

未来,通过引入月球辐照度模型,可以实现可见近红外谱段的绝对辐射定标。本文描述的方法可以应用于其他与中分辨率光谱成像仪观测原理类似的遥感成像仪器。

- [7] 陈林,张鹏,吴荣华,等. 月球目标监测风云二号静止气象卫星可见光辐射响应变化 [J]. *遥感学报*, 2018(2): 211-219
- CHEN L, ZHANG P, WU R H, *et al.*. Monitoring radiometric response change of visible band for FY-2 geostationary meteorological satellite by lunar target [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018(2): 211-219. (in Chinese)
- [8] 郭强,陈博洋,杨昌军,等. 风云二号卫星水汽波段在轨辐射定标新方法 [J]. *红外与毫米波学报*, 2012, 31(6): 5.
- GUO Q, CHEN B C, YANG CH J, *et al.*. A new approach of on-orbit radiometric calibration for water-vapor band of FY-2 satellite [J]. *Journal of Infrared & millimeter Wave*, 2012, 31(6): 5. (in Chinese)
- [9] 张璐,张鹏,胡秀清,等. 月球辐射照度模型比对及地基对月观测验证. [J]. *遥感学报*, 2017, 21(6): 864-870.
- ZHANG L, ZHANG P, HU X Q, *et al.*. Comparison of lunar irradiance models and validation of lunar observation on Earth [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(6): 864-870. (in Chinese)
- [10] ZHANG L, ZHANG P, HU X Q. A novel hyperspectral lunar irradiance model based on ROLO and mean equigonal albedo [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 142 (2017): 657-664.

- [11] 吴荣华,张鹏,杨忠东,等. 基于月球反射的遥感器定标跟踪监测 [J]. 遥感学报, 2016, 20(2): 278-289.
WU R H, ZHANG P, YANG ZH D, *et al.*. Monitor radiance calibration of the remote sensing instrument with reflected lunar irradiance [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(2): 278-289. (in Chinese)
- [12] XU N, NIU X H, HU X Q, *et al.*. Prelaunch calibration and radiometric performance of the advanced MERSI II on FengYun-3D [J]. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 2018.
- [13] YANG Z D, ZHEN Y Q, YIN Z S, *et al.*. Prelaunch radiometric calibration of the tansat atmospheric carbon dioxide [J]. *Grating Spectrometer*, 2018:1-9.
- [14] YANG J, ZHANG X Q, WEI C Y, *et al.*. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites-FengYun 4 (FY-4) [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, 98(9).
- [15] 胡秀清, 张里阳, 郑照军, 等. FY-3A 中分辨率光谱成像仪热红外通道的多探元辐射定标 [J] 光学精密工程, 2010, 18(9): 1972-1980.
HU X Q, ZHANG L Y, ZHENG ZH J, *et al.*. FY-3A multi-detector radiometric calibration for infrared band of medium resolution spectral imager [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 1972-1980. (in Chinese)

作者简介:



吴荣华(1982—),男,辽宁辽阳人,高级工程师,博士研究生,主要从事可见光近红外谱段遥感成像仪辐射定标方面的研究。E-mail: wurh@cma.gov.cn

通讯作者:



张鹏(1970—),男,陕西铜川人,博士,研究员,博士生导师,1998年于中科院大气物理研究所获得博士学位,主要从事卫星大气遥感、遥感仪器定标和大气辐射传输计算研究。E-mail: zhangp@cma.gov.cn