

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.02.006

嵩山遥感定标场靶标反射率的自动测量方法

潘琰^{1,2}, 李新^{1*}, 李照洲³, 张权¹, 张艳娜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, 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

3 中国资源卫星应用中心, 北京 100094)

摘要: 利用自主研发的地表反射自动监测光谱仪 (ARMS) 和可见-短波红外光谱辐照度计 (HIM), 实现了嵩山遥感定标场内三种灰阶靶标反射率的自动测量, 并与使用 ASD 便携式光谱仪人工测量的靶标反射率开展了比对。两种方法的比对结果表明: 在 400~1600 nm 范围内, 自动化测量与人工测量的反射率数据在非大气吸收波段的相对偏差优于 $\pm 2\%$ 。进一步基于自动化设备的观测数据, 分析了 2019 年 10 月至 2020 年 11 月场地内的靶标反射率。分析结果表明, 受环境变化的影响, 嵩山场内灰阶靶标的反射率也会发生变化, 且反射率的变化趋势与波长范围及测量区域有关。在整个波段范围内, 反射率的标准偏差在 $\pm 2.5\%$ 以内。该工作的开展为基于嵩山遥感定标场的自动化、高频次在轨辐射定标提供了有力的技术支撑。

关键词: 嵩山定标场; 在轨替代定标; 灰阶靶标; 光谱反射率

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)02-141-012

Automatic measurement method of target reflectivity at Songshan Remote Sensing Calibration Field

PAN Yan^{1,2}, LI Xin^{1*}, LI Zhaozhou³, ZHANG Quan¹, ZHANG Yanna¹

(1 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3 China Center for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China)

Abstract: Based on the self-developed automated reflectance monitoring spectrometer (ARMS) and hyperspectral irradiance meter (HIM) in visible-shortwave infrared band, the automatic measurement of the reflectance of three gray-scale targets in Songshan Remote Sensing Calibration Field, China, was realized, and the data obtained by the self-developed instruments was compared with the data acquired

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB0504600, 2018YFB0504604), 中国科学院合肥物质科学研究院院长基金 (YZJJ2019QN5)

作者简介: 潘琰 (1992-), 女, 河南商丘人, 博士研究生, 主要从事光学精密仪器设计及卫星传感器辐射定标技术的研究。

E-mail: Py2015@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 李新 (1975-), 安徽萧县人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事卫星传感器辐射定标技术、光学精密仪器技术研究。

E-mail: xli@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2020-12-24; 修改日期: 2021-05-19

*通信作者。

manually by the ASD portable spectrometer. The comparison results of the two methods show that the relative deviation of the reflectance data is better than $\pm 2\%$ in the range of 400-1600 nm for non-atmospheric absorption band. Then the target reflectance data in the site acquired by the automated equipments from October 2019 to November 2020 was analyzed in details. The analysis results show that the target reflectance of Songshan field is changeable with the environment, and the change trend of reflectance is related to the wavelength range and the measurement area, while the standard deviation of reflectance is within $\pm 2.5\%$ in the whole band. The work provides a strong technical support for the automatic and high-frequency on-orbit radiation calibration based on the Songshan Remote Sensing Calibration Field.

Key words: Songshan Calibration Field; on-orbit vicarious calibration; grayscale target; spectral reflectance

0 引言

卫星载荷在轨运行过程中受真空环境、太阳辐射、仪器老化等因素的影响,其性能会发生衰变,因而会导致遥感器获得的观测数据与实际数据产生较大的偏差。为了校正卫星载荷的测量偏差,卫星在轨运行过程中,需要定期进行高精度的辐射定标,以对卫星遥感器的性能变化进行监测^[1]。卫星在轨辐射定标通常采用场地替代定标法,具体过程为:在卫星过境前后通过手动或自动化仪器同步观测,获得辐射定标场的反射率、大气消光参数和气象参数,通过辐射传输模型计算获得卫星入瞳处的辐亮度,并将该辐亮度数据与遥感器同步观测的数据相对比,即可得到卫星的绝对辐射定标系数^[2-4]。

基于大面积自然辐射校正场(如敦煌辐射校正场、青海湖辐射校正场等)的场地替代定标能够实现单一辐亮度的定标。但是满足定标要求的大面积均匀场数量有限,且我国大面积自然辐射定标场的反射率较低,定标的人力和物力成本较高,不利于定标频次和定标精度的提升^[5,6]。随着光学遥感器空间分辨率的提高,基于空间均匀性好、光谱反射率平坦、朗伯性高的人工靶标的高精度在轨辐射定标成为可能^[7]。我国在嵩山、内蒙古、云南等地已经规划并建设了人工固定靶标场,并开始应用于高分辨卫星载荷的在轨定标。

由定标过程可知,定标场反射率数据的获取是在轨辐射定标的关键环节。目前,地表反射率通常采用人工观测方式获取,通过ASD (Analytica spectra devices) 或SVC (Spectra Vista Corporation)等光谱仪交替测量定标场和参考板,二者的比值与标准参考板反射率的乘积即为场地的地表反射率^[8]。这种测量方法能够获得较高的测量精度,但是测量过程中需要耗费大量的人力和物力,因此,难以适应高频次定标的需求。为适应差异化、多样化、复杂化的新型卫星遥感器的高频次在轨辐射定标需求^[9,10],更好地跟踪遥感器的在轨辐射特性变化,亟需获取能够长期准确描述场地特性的反射率数据。

为减少人工和测量成本,适应卫星高频次定标的应用需求,中国科学院安徽光学精密机械研究所(以下简称安光所)研制了多种自动化观测仪器。其中地表反射自动监测光谱仪(ARMS)和可见-短波红外光谱辐照度仪(HIM)结合,可实现场地反射率的长期自动监测。通过在嵩山定标场布设上述两种仪器,实现了定标场内灰阶靶标反射率的长期自动测量,为实现基于场地替代定标方法的卫星在轨高频定标提供了数据支撑。

1 定标场靶标反射率的自动测量

1.1 中国(嵩山)遥感定标场

中国(嵩山)遥感定标场位于 $112^{\circ}56'07''\text{E}\sim 113^{\circ}11'32''\text{E}$, $34^{\circ}23'31''\text{N}\sim 34^{\circ}35'53''\text{N}$, 属于温带季风型大陆性气候, 气候特征具有一定的代表性。嵩山遥感定标场占地3.846万平方米, 由主功能区、遥感塔和辅助设施三部分组成。其中, 主功能区面积为2.4万平方米, 布设了1幅辐射状扇形靶标, 1幅大面积刃边灰阶靶标, 1个点光源靶标安置区, 1幅航空分辨率监测靶标, 1条无人机起降跑道和1个旋翼无人机起降台, 主功能区布设分布如图1所示。嵩山遥感定标场通过设置不同反射率的靶标, 可以实现不同波段高分率遥感器的在轨辐射定标、在轨性能日常监测及遥感产品精度的检验等工作^[1]。

嵩山遥感定标场主功能区内的大面积刃边灰阶靶标具体包括三种不同类型靶标, 这三种靶标的标称光谱反射率分别为40%、5%和60%。三种靶标呈L型排列, 靶标尺寸均为 $35\text{ m}\times 35\text{ m}$ 。通过星地同步观测刃边靶标的反射率和场地参数, 可对高分率遥感载荷进行在轨辐射定标。灰阶靶标长期暴露在野外环境中, 环境中灰尘、雨雪、温度变化等对靶标反射率的影响较大。因此, 通过对定标场内地表反射率进行长时间监测, 可以从宏观上了解定标场地表反射率的时间稳定性, 从而保证卫星在轨图像质量评价和在轨辐射定标的准确性。基于上述原因, 安光所率先在嵩山遥感场内布设自动化观测仪器, 实现定标场内靶标反射率数据的长期自动监测。

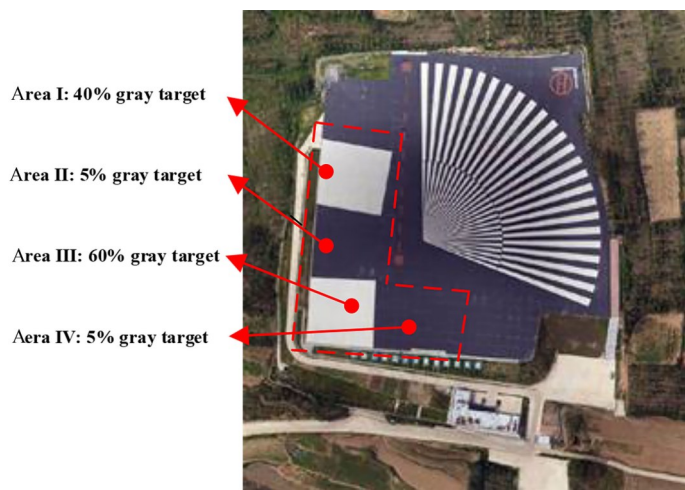


图1 嵩山遥感定标场俯瞰图

Fig. 1 Aerial view of Songshan Remote Sensing Calibration Field

1.2 靶标反射率自动测量原理

地表反射率是地表反射光通量与总入射光通量的比值, 可通过地表反射辐亮度 L_{ground} 和入射总辐照度 E_{total} 的比值计算获得^[12], 计算公式为

$$\rho_{\text{ground}}(\theta, \Phi, \lambda) = \pi \frac{L_{\text{ground}}(\theta, \Phi, \lambda)}{E_{\text{total}}(\theta, \Phi, \lambda)}, \quad (1)$$

式中 ρ_{ground} 为地表反射率, θ 为测量时刻的太阳天顶角, Φ 为测量时刻的太阳方位角, λ 为测量波长。

2019年10月, 嵩山遥感定标场布设了安光所研制的四台可进行长时序无人值守的自动化地面定标设备,

包括3台 ARMS 和1台 HIM。两种仪器配合可以实现场地靶标反射率的长期自动观测。其中, ARMS 可以实现灰阶靶标反射光谱辐亮度 L_{ground} 的自动观测, HIM 可以实现地表入射光谱辐照度 E_{total} 的自动观测。

1.3 自动化观测设备

嵩山定标场共布设了3台 ARMS, 其仪器编号分别为 ARMS-001、ARMS-002 和 ARMS-003, 1台 HIM, 其仪器编号为 HIM-002。其中, ARMS-001 用于测量定标场 III 号区域内灰阶靶标的反射辐射; ARMS-002 用于测量场 I 号区域内灰阶靶标的反射辐射; ARMS-003 用于测量场 II 号区域内灰阶靶标的反射辐射; HIM002 放置在场 III 号区域, 用于测量场内的总照度数据 (各区域参见图 1)。所有仪器均靠近靶标场边缘位置放置, ARMS 横臂朝向靶场并保证镜头的观测区域位于定标场内。

ARMS 可用于地表反射辐亮度的自动观测, 图 2 为 ARMS 的三维模型和实物图。ARMS 具有两种观测模式, 分别为地表辐亮度观测模式和自校准观测模式。两种模式均可以实现自动化观测, 保证测量的准确性。在地表辐亮度观测模式下, 镜头获得靶标的反射辐亮度。在自校准观测模式下, 通过控制仪器的切换机构, 将白板切换到观测镜头下方, 实现白板的反射辐亮度观测。

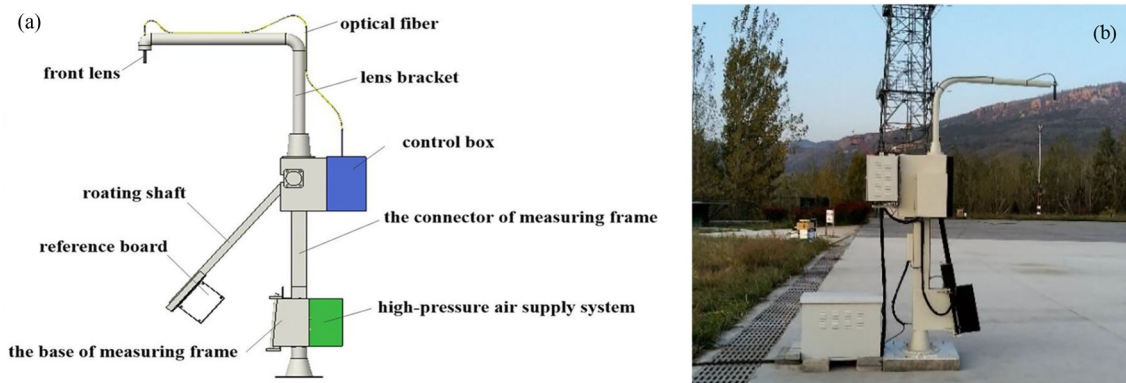


图 2 地表反射自动监测光谱仪模型 (a) 和实物 (b)

Fig. 2 Model (a) and picture (b) of automated reflectance monitoring spectrometer

HIM 能够直接获得地表入射光谱总照度和天空漫射照度, 仪器三维模型和实物图如图 3 所示。仪器通过二维转台、太阳跟踪装置、四连杆运动装置与遮光球的配合, 实现总照度和漫射照度的自动观测。在总照度测量模式下, 四连杆运动装置位于原点, 此时, 遮光球低于余弦校正器的入光口平面。在天空漫射照度测量模式下, 四连杆运动装置带动遮光球向上运动, 直至遮挡球遮挡住太阳的直射辐射入射至余弦校正器入光口, 从而实现天空漫射辐照度的测量。两种模式测量之差为太阳直射辐照度, 漫照度模式测量结果与总照度模式测量结果之比为漫总比。

ARMS 和 HIM 的主要指标参数如表 1 所示。

2 反射率自动测量的精度验证

为了评估 ARMS 与 HIM 联合测得的反射率数据的准确性, 将其与采用便携式光谱仪人工测量获得的反射率数据进行比对验证。具体验证流程如图 4 所示。

便携式光谱仪采用 ASD 公司的 FieldSpec 光谱仪, FieldSpec 光谱仪是国际上常用的便携式地物光谱仪, 具有光谱范围宽、光谱分辨率高、操作简便、可靠性高等优点。采用 ASD 光谱仪交替测量场内灰阶靶标与标

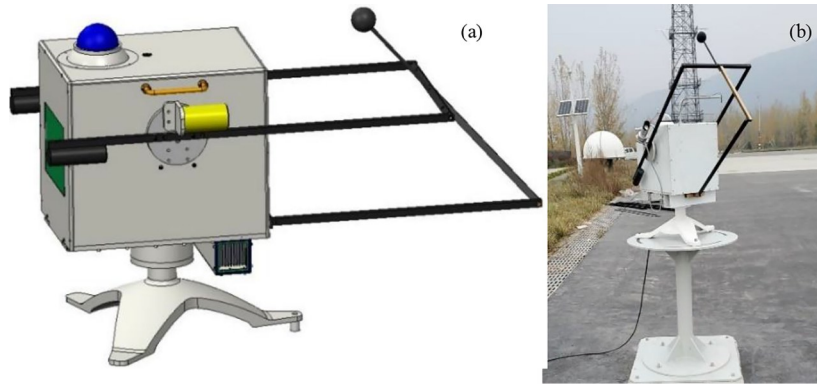


图 3 可见—短波红外光谱辐照度仪模型 (a) 和实物 (b)

Fig. 3 Model (a) and picture (b) of visible-shortwave infrared hyperspectral irradiance meter

表 1 ARMS 和 HIM 主要指标参数和功能

Table 1 Main parameters and functions of ARMS and HIM

Instrument	ARMS	HIM
Spectral range/nm	350~1600	400~2400
FWHM	≤ 4 nm(@350~950 nm) ≤ 15 nm(@950~1600 nm)	≤ 4 nm (@400~950 nm) ≤ 15 nm (@950~1650 nm) ≤ 20 nm (@1650~2400 nm)
Functions	1) to automatically measure the reflected radiance of surface in a continuous spectrum; 2) to automatically observe in the wild; 3) the function of self-cleaning reference board; 4) self-calibration based on the reference board.	1) to automatically measure the total irradiance; 2) to automatically measure the sky light diffuse irradiance; 3) to automatically obtain the direct solar irradiance; 4) to automatically obtain the ratio between total and diffuse irradiance.
Data transmission	4G	4G
Operating temperature/°C	-30~+60	-30~+60

准参考板, 分别获得灰阶靶标和标准参考板辐亮度, 二者的比值与参考板反射率的乘积即为灰阶靶标的反射率。计算公式为

$$\rho = \rho_{\text{panel}} \frac{L_{\text{ground}}}{L_{\text{panel}}}, \tag{2}$$

式中 ρ_{panel} 为标准参考板的反射率^[13,14], L_{ground} 、 L_{panel} 分别为 ASD 光谱仪测得的灰阶靶标和标准参考板的辐亮度。

2019 年 10 月 29 日, 采用两种方法分别测量嵩山场内 I 号区域、II 号区域和 III 号区域内灰阶靶标的反射率, 测量结果分别如图 5 (a)、6 (a)、7 (a) 所示。为了评估两种方法测得数据的一致性, 可采用式 (3) 计算两种测量方法的相对偏差, 计算结果分别如图 5 (b)、6 (b)、7 (b) 所示。

$$\sigma(\lambda) = \frac{\rho_{\text{ARMS}} - \rho_{\text{ASD}}}{\rho_{\text{ASD}}} \times 100\%. \tag{3}$$

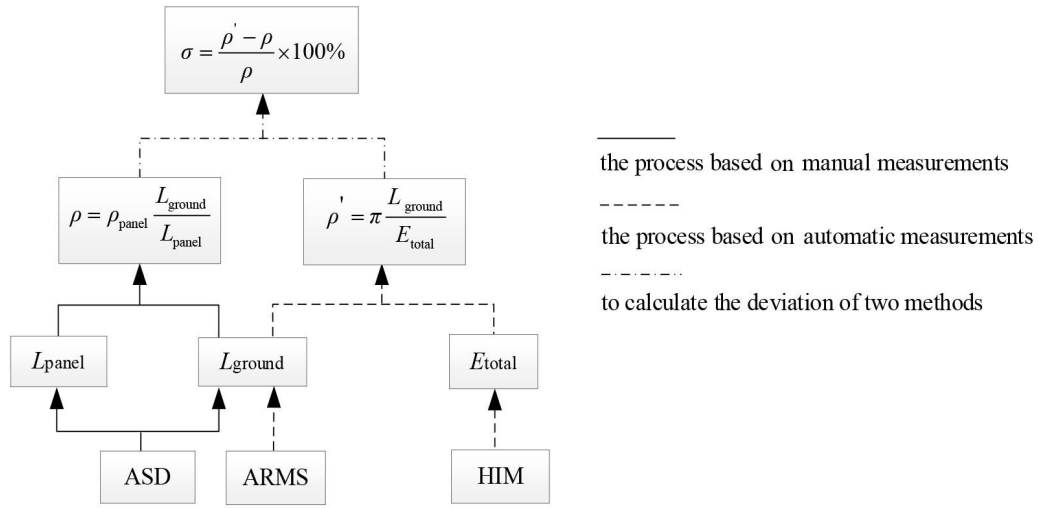


图 4 反射率精度验证流程

Fig. 4 Verification process of the reflectance accuracy

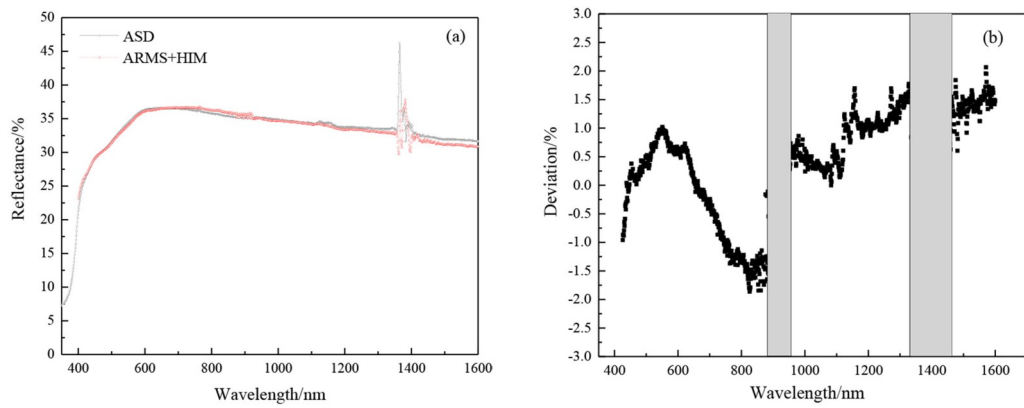


图 5 I 号区域内两种方法的测量比对。(a) 两种反射率的对比; (b) 测量偏差

Fig. 5 Measurement comparison of two methods in Area I . (a) Comparison of two reflectance; (b) measurement deviation

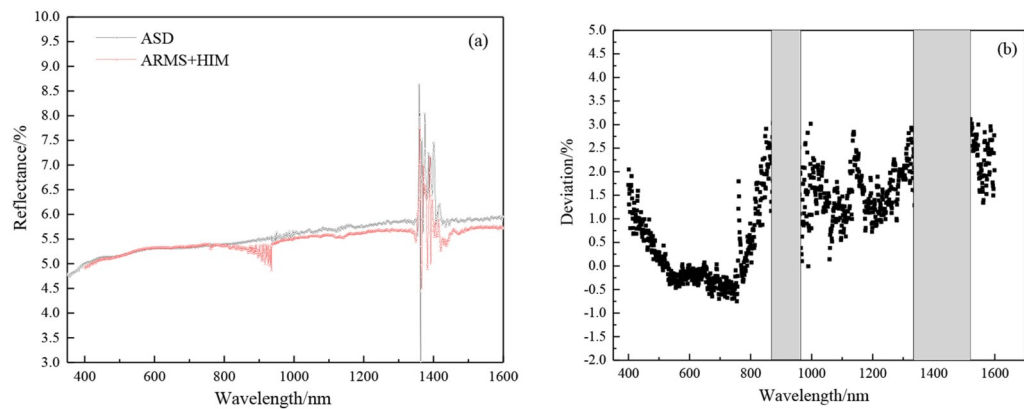


图 6 II 号区域内两种方法的测量比对。(a) 两种反射率的对比; (b) 测量偏差

Fig. 6 Measurement comparison of two methods in Area II . (a) Comparison of two reflectance; (b) measurement deviation

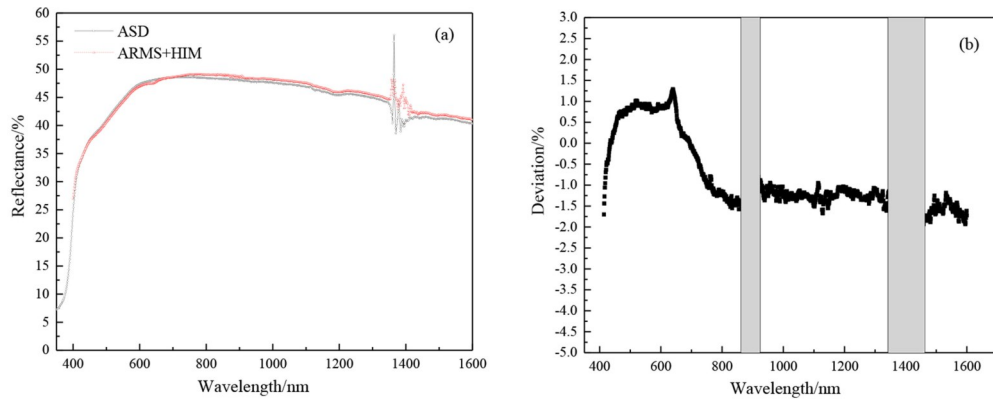


图 7 III号区域内两种方法的测量比对。(a) 两种反射率的对比; (b) 测量偏差

Fig. 7 Measurement comparison of two methods in Area III. (a) Comparison of two reflectance; (b) measurement deviation

由图 5 (a)、6 (a) 和 7 (a) 可知, 在 400~1600 nm 的光谱范围内, 两种测量方法具有较好的一致性。两种方法测得的反射率数据在 900 nm 和 1400 nm 附近均有较大波动, 这是因为此波段处于大气吸收带的位置^[15], 大气层顶入射至地表的辐射较弱, 信噪比低, 仪器测量偏差大。由图 5 (b)、6 (b) 和 7 (b) 可知, 去除掉大气吸收带的影响, 两种测量方法的相对偏差大部分在 ±2% 以内。因此, 采用 ARMS 和 HIM 相结合的方式获得场地反射率数据自动测量的方法具有较高的测量精度和可信度。

通过 HIM 测得的总照度数据可以了解比对当天的天气情况。图 8 为 2019 年 10 月 29 日不同波段随时间的总照度数据。由图可知, 全天的天气状况整体较好, 仅在 11:30—13:06, 天空有少量云层, 在 11:57, 天空有较厚云层快速飘过。测量过程中天气的变化是两种测量方法产生偏差的重要原因。

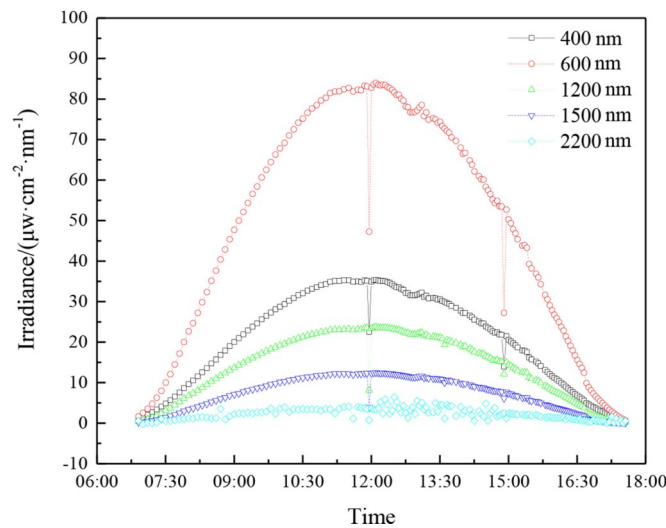


图 8 2019 年 10 月 29 日 HIM-002 测得的不同波段的全天总照度数据

Fig. 8 All day total irradiance in different bands measured by HIM-002 on October 29, 2019

两种测量方法产生的相对偏差主要由以下几个方面造成: 1) 测量时间不一致。仪器测量过程中, 太阳位置、云量及大气状况等一直处于变化状态, 仪器间测量时间的不一致将导致测量偏差。2) 人工操作的影响。人工测量过程中需要确保观测镜头垂直于观测目标和标准参考白板, 这对于操作人员的操作水平有一定的

要求。3) 标准参考白板的非朗伯特性及自身反射率定标精度的影响。采用便携式光谱仪的测量方法引入了标准参考白板的反射率。计算过程中采用的是标准参考板的垂直方向反射率, 未考虑标准参考板的双向反射分布函数 (BRDF) 特性。4) 测量目标的非均匀性。嵩山遥感定标场为人工铺设的固定式靶标场, 受环境中风、霜、雨、雪和温度变化等影响, 目标的均匀性及方向反射特性时刻处于变化状态, 很难保持理想状态。5) 仪器自身因素, 由于仪器噪声、非线性等引起测量偏差。

3 靶标反射率的长期自动监测

仪器自2019年10月起一直布设在嵩山遥感定标场进行自动观测, 从而实现定标场内靶标反射率的长期自动监测。基于自动化观测仪器的测量数据, 可对嵩山遥感定标场靶标反射率进行长时序的数据分析。所采用数据的测量时间为2019年10月至2020年11月。根据HIM测得的总照度数据对数据进行筛选, 筛选的依据为在天气晴朗、天空少云或无云情况下, HIM测得的总照度数据在全天范围内呈余弦变化。如图9所示分别为HIM-002在2020年6月3日和2020年7月27日测得的全天总照度数据。由图中可知, 6月3日全天的天气质量较好, 仅在上午偶有少量云层。而7月27日天气质量不佳, 太阳被云层完全遮挡且天空云层变化较快, 测得的数据为天空漫射照度。

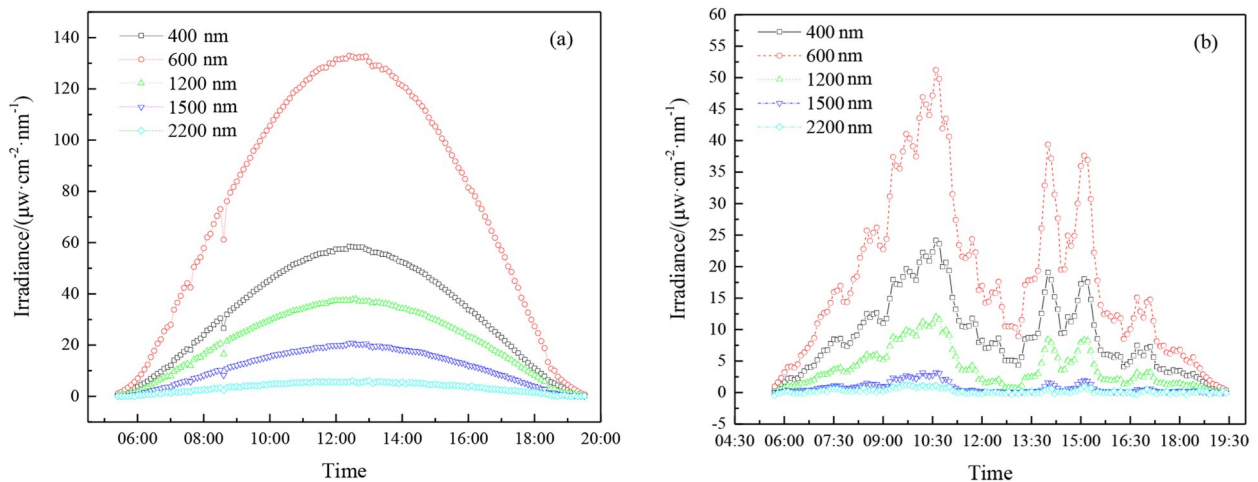


图9 HIM-002不同波段全天的总照度数据。(a) 2020年6月3日; (b) 2020年7月27日

Fig. 9 All day total-irradiance of HIM-002 in different bands. (a) June 3, 2020; (b) July 27, 2020

在试验周期内, ARMS-002在信号测量过程中快门未正常打开, 测量值为两次本底信号的差值。因此, ARMS-002测量数据不能反映嵩山场 I 号区域靶标反射辐射亮度的变化。图10所示为ARMS-002在不同时间段测得的靶标反射辐射亮度数据。数据失效原因初步判断为ARMS-002快门开关异常, 异常的原因可能是由于仪器密封不良, 导致环境中的水汽进入仪器内部, 使快门叶片吸附在一起而无法打开。也可能是由于快门芯片损坏而导致快门开关异常。

因此, 仅对嵩山场内 ARMS-001, ARMS-003 与 HIM-002 的测量数据进行数据分析, 了解嵩山场内 II 号区域和 III 号区域靶标反射率的变化情况。如图11所示为不同日期正午时分测得的 II 号区域的靶标反射率数据, 图12为不同日期正午时分测得的 III 号区域的靶标反射率数据。由图11和图12可知, 在400~1600 nm

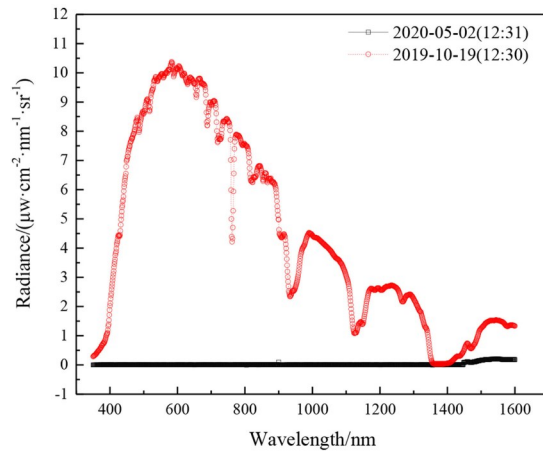


图 10 ARM002 在不同时间段测得的靶标反射辐射亮度数据

Fig. 10 Target reflected radiance data measured by ARM002 at different time

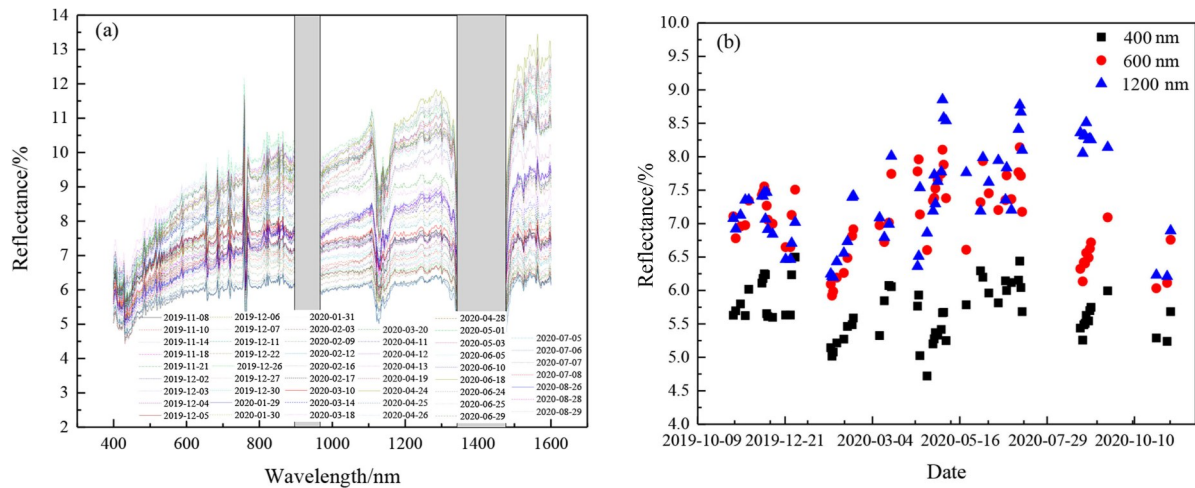


图 11 II 号区域靶标反射率随时间的变化。(a) 全波段范围内; (b) 部分波长点

Fig. 11 The changes of reflectance in the Area II . (a) In the whole bands; (b) some wavelengths

的波长范围内, 不同时间测得的靶标反射率数据形状相似, 幅值会上下浮动。即嵩山遥感定标场内灰阶靶标的反射率并不是固定不变的, 而是会随环境发生变化的。

为进一步了解嵩山场灰阶靶标反射率随波长的变化情况, 计算了测量周期内反射率数据的标准偏差, 结果如图 13 所示。由图可知, 在 400~1100 nm 范围内, 两个区域的反射率变化趋势并不一致。对于 II 号区域, 反射率标准偏差随波长的增加而增大。对于 III 号区域, 反射率标准偏差先增大后减小, 最大偏差约为 2.25%, 产生最大偏差的波长约为 600 nm。两个区域的变化趋势可能与靶标反射率有关。由图 6 和图 7 可知, 去除掉大气吸收带, II 号区域靶标反射率基本随波长的增加而缓慢增加, III 号区域靶标反射率随波长的增加先增大后减小。这与图 13 的变化趋势一致。在 1100~1600 nm 范围内, 去除掉大气辐射传输的影响, 两个区域反射率标准偏差均随波长增加而增大。这一变化规律与 II 号区域的反射率变化趋势一致, 而与 III 号区域反射率的变化趋势相反。具体原因需进一步分析和验证。在 1100 nm 附近, 两区域反射率标准偏差均有小范围波

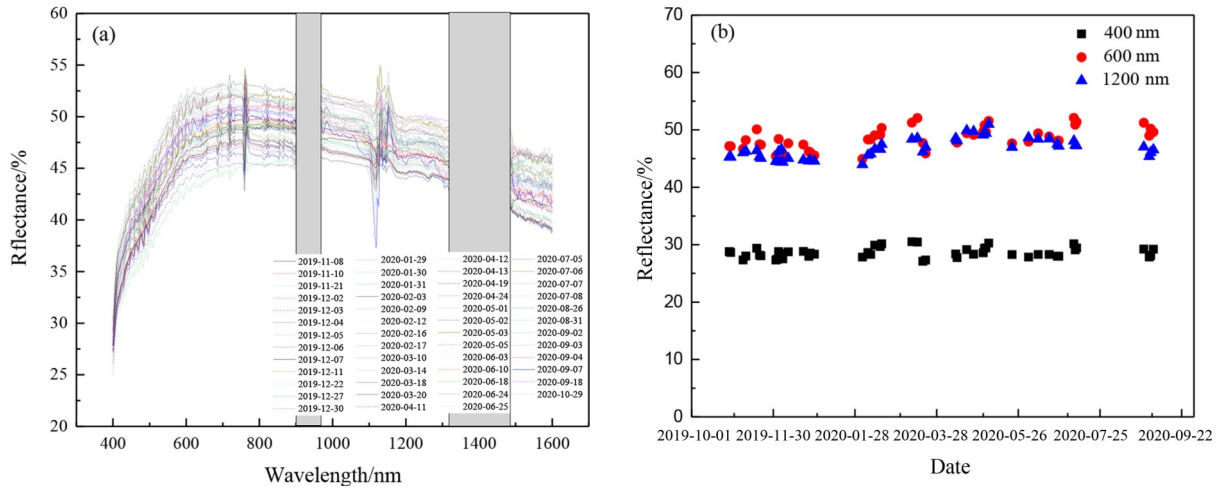


图 12 III号区域靶标反射率随时间的变化。(a) 全波段范围内; (b) 部分波长点

Fig. 12 The changes of reflectance in the Area III. (a) In the whole bands; (b) some wavelengths

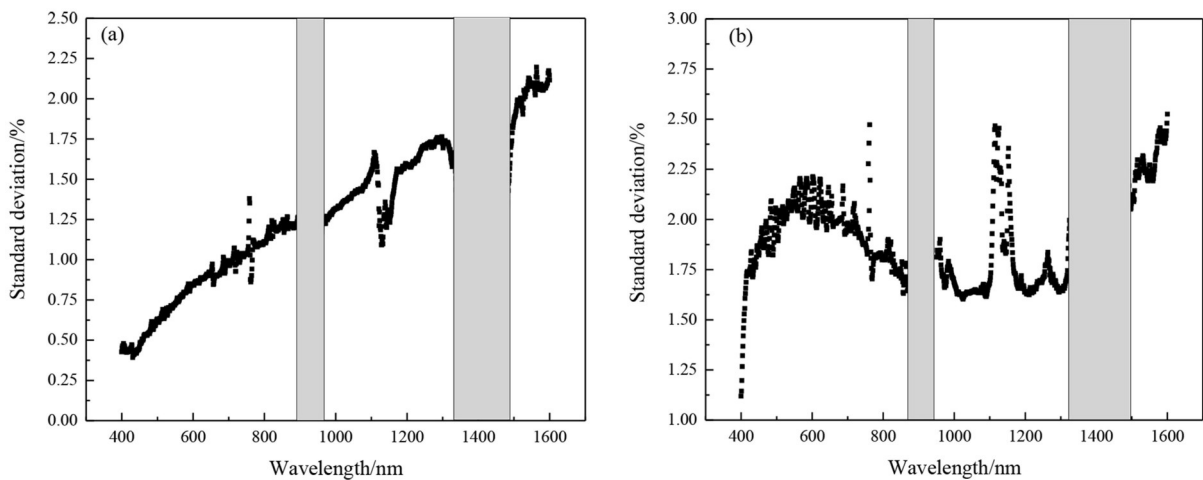


图 13 场地内靶标反射率的标准偏差。(a) II号区域; (b) III号区域

Fig. 13 The standard deviation of reflectance in the field. (a) Area II; (b) Area III

动, 这可能是因为该波段为水汽弱吸收带。在整个波段范围内, 两区域反射率标准偏差均在 $\pm 2.5\%$ 以内。

4 结 论

采用自行研制的地表反射自动监测光谱仪 (ARMS) 和可见-短波红外光谱辐照度仪 (HIM) 相结合的方式, 实现了地表反射率的长期自动观测。采用自动化观测仪器和 ASD 便携式光谱仪分别对嵩山遥感定标场主功能区内 I 号、II 号和 III 号区域内的灰阶靶标进行靶标反射率的比对观测, 结果表明, 去除掉大气吸收带的影响, 两种方法的测量偏差大部分优于 $\pm 2\%$ 。因此, 可以认为自动化观测仪器能够实现较高精度的场地反射率自动测量。分析了自 2019 年 10 月至 2020 年 11 月自动化观测仪器测得的靶标反射率, 结果表明, 嵩山定标场内的灰阶靶标受户外环境变化的影响, 其反射率也会发生变化, 且反射率的变化趋势与测量区域的反射率和波长范围有关, 而他们之间的变化关系还需进一步分析与验证。去除掉大气吸收波段的影响, 嵩山定标

场内Ⅱ号区域和Ⅲ号区域的靶标反射率标准偏差均在 $\pm 2.5\%$ 以内。本研究工作验证了直接法观测场地反射率的可行性,以及场地反射率长期自动监测数据的有效性,为后续实现卫星遥感器的在轨自动化定标、高频次定标提供了有力的数据支撑。

参考文献:

- [1] Li X, Zheng X B, Yin Y P. Progress in automated site vicarious calibration technologies [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(1): 17-21.
李新, 郑小兵, 尹亚鹏. 场地自动化定标技术进展 [J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(1): 17-21.
- [2] Gao H L, Gu X F, Yu T, et al. The research overview on visible and near-infrared channels radiometric calibration of space-borne optical remote sensors [J]. *Remote Sensing Information*, 2010, 25(4): 117-128.
高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 星载光学遥感器可见近红外通道辐射定标研究进展 [J]. 遥感信息, 2010, 25(4): 117-128.
- [3] Dong Y, Lv J Y, Song Q T, et al. Introduction to the principle and process of radiometric calibration based on reflectivity method [J]. *Technology Innovation and Application*, 2016, (24): 71-72.
董毅, 吕佳彦, 宋青涛, 等. 反射率基法辐射定标原理和流程介绍 [J]. 科技创新与应用, 2016, (24): 71-72.
- [4] Slater P N, Bigger S F, Holm R G, et al. Reflectance-and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 22(1): 11-37.
- [5] Ma X H, Yu T, Gao H L, et al. Characterization evaluation and potential application analysis of the Inner Mongolia radiometric calibration site [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2011, 23(4): 31-36.
马晓红, 余涛, 高海亮, 等. 内蒙古辐射校正场特性评价与应用潜力分析 [J]. 国土资源遥感, 2011, 23(4): 31-36.
- [6] Wang Z M. Ground test sites for absolute radiometric calibration of China resources satellite [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 1999, (3): 40-46.
王志民. 中国资源卫星绝对辐射校正场 [J]. 国土资源遥感, 1999, (3): 40-46.
- [7] Chen H Y, Li S L, Si X L, et al. Multispectral imager vicarious radiometric calibration based on gray-scale tarps [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(Sup 1): 28-34.
陈洪耀, 李胜利, 司孝龙, 等. 多光谱相机基于灰阶靶标的在轨绝对辐射定标 [J]. 遥感学报, 2012, 16(Sup 1): 28-34.
- [8] Hou Z K, Zhang Y N, Li X, et al. Research on surface reflectivity measurement system based on ratio method [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2019, 36(5): 620-626.
侯志宽, 张艳娜, 李新, 等. 基于比值法的地表反射率测量系统研究 [J]. 量子电子学报, 2019, 36(5): 620-626.
- [9] Liu E C, Li X, Wei W, et al. Automatic field calibration and analysis of satellite based on hyper-spectral ratio radiometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(12): 4076-4081.
刘恩超, 李新, 韦玮, 等. 基于超光谱比值辐射仪的卫星自动化场地定标与分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(12): 4076-4081.
- [10] Zheng X B. Some respects for development of radiometric calibration techniques for optical remote sensing satellites [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(1): 2-8.
郑小兵. 发展光学遥感卫星辐射定标技术的几点思考 [J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(1): 2-8.
- [11] Li Z Z, Xu W, Fu Q Y, et al. Building and application for China Songshan artificial target site [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(2): 81-89.
李照洲, 徐文, 傅俏燕, 等. 中国(嵩山)固定式靶标场建设及其应用 [J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(2): 81-89.

- [12] Duggin M J, Cunia T. Ground reflectance measurement techniques: A comparison [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(23): 3771-3777.
- [13] Li X, Zheng X B, Xun L N, *et al.* Design of automated field hyperspectral BRDF measurement system [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(2): 262-264, 268.
李新, 郑小兵, 寻丽娜, 等. 室外高光谱 BRDF 自动测量系统的设计[J]. 光学技术, 2008, 34(2): 262-264, 268.
- [14] Pang W W, Zheng X B, Lu J H, *et al.* Reflectance characteristics of Dunhuang radiometric calibration test site [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2015, 10(6): 472-481.
庞伟伟, 郑小兵, 陆俊桦, 等. 敦煌辐射校正场地表反射率稳定性分析 [J]. 大气与环境光学学报, 2015, 10(6): 472-481.
- [15] Liou K N. *An Introduction to Atmospheric Radiation* [M]. Guo C L, Zhou S J, Transl. Beijing: Meteorological Press, 2004: 180-188.
廖国男. 大气辐射导论 [M]. 郭彩丽, 周诗健, 译. 北京: 气象出版社, 2004: 180-188.