

文章编号 1004-924X(2023)16-2319-14

地表反射率外场无人值守测量方法

夏志伟, 王 硕, 衣小龙, 王玉鹏*, 方 伟

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春)

摘要:在轨运行载荷的性能不可避免地出现衰减, 场地定标是一些卫星载荷在轨辐射定标主要手段之一, 其精度主要取决于地表反射率的准确程度。本文介绍了地表反射率自动观测系统原理和系统组成, 并在敦煌辐射校正场实现无人值守自动化、无间断的地表光谱反射率测量, 采用标准白板法和辐照度法两种方法同步观测, 对两种方法获取的地表反射率数据分别进行了短期和长期稳定性的对比分析, 地表反射率可直接溯源至标准白板反射率, 减少了定标传递环节。结果表明: 标准白板法测量地表反射率短期均值偏差为 0.130%, 长期测量 350~600 nm 波段均值偏差为 4.996%, 600~2 500 nm 波段均值偏差为 2.104%。标准白板法测量地表反射率合理可行, 测量曲线连续、平滑、抖动少, 可通过定期清洁标准白板提高测量准确性。辐照度法短期测量与标准白板法具有相近的性能, 350~1 900 nm 波段均值偏差为 0.236%, 1 900~2 500 nm 波段均值偏差为 0.443%。长期测量地表反射率整体漂移小, 平均漂移为 0.735%, 但存在反射率曲线局部噪声大的缺点。可将两种方法相结合, 获得更为准确的地表反射率数据。

关键词:标准白板法; 辐照度法; 地表反射率; 自动观测系统; 场地定标

中图分类号: TP23; P422.1+5 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233116.2319

Method for unattended measurement of surface reflectance in field sites

XIA Zhiwei, WANG Shuo, YI Xiaolong, WANG Yupeng*, FANG Wei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: wangyp@ciomp.ac.cn

Abstract: The performance of on-orbit payloads is inevitably degraded. Field calibration is a primary method of on-orbit radiometric calibration for some satellite payloads, and its accuracy mainly depends on how accurate the surface reflectance is. This study introduces the working principle and system composition of the Automatic Observation System of Surface Reflectance, and unattended, automated, and continuous spectral surface reflectance measurements were conducted at the Dunhuang Radiation Calibration Field. The short- and long-term stabilities of the surface reflectance data acquired simultaneously were compared and analyzed using the standard whiteboard and irradiance methods, respectively. The surface reflectance is directly traceable to the reflectance of the standard whiteboard, and the data processing method reduces the calibration transfer link. The results are as follows. The mean deviation of short-term measurement of the surface reflectance by the standard whiteboard method is 0.130%. For the long-term mea-

收稿日期: 2022-07-13; 修订日期: 2022-11-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 42001316)

surement, the mean deviation of the 350-600 nm band is 4.996%, and the mean deviation of the 600-2 500 nm band is 2.104%. The standard whiteboard method is reasonable and feasible for measuring the surface reflectance, and the figure of reflectance is continuous and smooth, and it has less fluctuation. The accuracy of reflectance can be improved by regularly cleaning the standard whiteboard. The short-term measurement of the irradiance method is similar to that of the standard whiteboard method; the mean deviation of the 350-1 900 nm band is 0.236%, and the mean deviation of the 1 900-2 500 nm band is 0.443%. For the long-term measurement, the overall drift of the reflectance is small, with an average drift of 0.735%. However, there is a disadvantage of large local noise in the reflectance curve. The two methods can be combined to obtain accurate surface reflectance data.

Key words: standard whiteboard method; irradiance method; surface reflectance; automatic observation system; field calibration

1 引言

在轨运行的载荷长期遭受太阳辐射、宇宙粒子冲击、原子氧等恶劣环境的影响,且仪器本身会随时间发生老化,其性能参数不可避免地会出现不同程度的衰减,需要通过定期定标来减小测量精度的降低^[1]。对于一些环境监测载荷,其定量探测具有严苛要求,仪器的辐射定标策略和定标精度至关重要^[2]。通过辐射定标可以确定遥感仪器系统特性,为提高仪器测量数据可信度提供重要依据^[3]。由于遥感载荷在轨运行过程中的性能退化并无通用的规律可循^[4],场地定标因不受卫星系统设计的限制,而成为已长期运行产生较大程度退化和无星上定标手段的卫星载荷在轨辐射定标主要手段之一^[5]。

敦煌辐射校正场是我国国家级光学辐射校正场,具有面积大、地势平坦、地表均一、方向特性较好等得天独厚的地理优势,已得到国际上的认可,适用于可见近红外遥感器的在轨绝对辐射定标。多年来,已被成功地用于高分一号、HJ 系列、FY 系列等多颗遥感卫星载荷的绝对辐射定标^[5-7]。通过实时测量的地表反射率,为地面场地定标基准提供数据支撑,有利于提高不同卫星载荷间的交互定标^[8]频次。

利用无人值守的设备辅助开展场地定标实验数据的获取是近十多年较为关注的问题,国内外有不少单位开展了此方面研究,并已在场中布设,如敦煌场的自动化多通道光谱辐射计^[9]、包头场的光谱式^[4,10]和通道式^[4]目标光谱自动观测

系统等。

场地定标精度主要取决于地表反射率的准确程度,目前虽已有设备可实现自动观测,但精度不能满足业务化需求,获取高精度地表反射率的方法仍需要现场人工测量^[7,11-12]、无人机遥测测量^[13-14],需要实验人员在现场值守测量。由于定标场地多为戈壁、沙漠,远离城镇,费时费力且不能获取连续不间断的反射率数据,已不能满足日益增长的高精度、季次乃至月次的高定标频次需求^[4],迫切需要对应的自动化观测设备和稳定可靠的测量方法。

本文采用自主研发的地表反射率自动观测系统,安装于敦煌辐射校正场,在恶劣的野外环境下,实现无人值守自动化、不间断的获取地表光谱反射率;采用标准白板法和辐照度法两种测量方法获取地表反射率,并对两种方法获取的地表反射率数据分别进行了短期和长期稳定性的对比分析;最后,对两种方法中测量数据的漂移、噪声等问题进行了分析,讨论了问题产生原因并给出了改进方法。

2 地表反射率自动观测系统

地表反射率自动观测系统为自主研发,包含地表反射率自动观测仪、漫总比自动观测仪两套设备。为实现无人值守自动工作,系统配备太阳总辐照度辐射表、雨传感器、风速计、温度传感器等环境参量传感器,并且系统设有多个工作模式:测量模式、待机模式、休眠模式等,能够根据

环境参量自动切换工作模式。在天气晴朗时进入测量模式实现野外场地可见、近红外地表光谱反射率的自动观测;在阴雨天、大风扬沙等恶劣天气时,切换到休眠模式以保护设备。其次,设备配备了网络通讯模块,实现测量数据的远程自动传输和设备运行状态监控。此外,夏季酷热、冬季严寒的恶劣外场环境对高光谱测量设备是一个严峻的考验,为提高设备环境适应性,对设备的光谱测量核心模块采取半导体制冷、加热片、外敷保温材料等措施进行温控,保证测量数据稳定度。

2.1 工作原理

本文中所述的地表反射率实际为场地的二向反射率因子(Bidirectional Reflectance Factor, BRFF),其定义为在相同的辐照度 E 条件下,地物向某个方向 θ 的反射辐射亮度 $L_{\text{object}}(\theta)$ 与理想漫反射朗伯体在相同方向上的反射辐射亮度 $L_{\text{diffuser}}(\theta)$ 作比值^[6]:

$$R_{\text{BRF}}(\theta) = L_{\text{object}}(\theta) / L_{\text{diffuser}}(\theta). \quad (1)$$

BRF 并没有对辐射环境做出限定,因此 BRF 的数值不仅取决于地物本身的反射特性,而且还与辐射环境有关。虽然 BRF 并不是一个理想的描述地物反射特性的物理量,但由于 BRF 容易实现实时测量,且在特定的物理应用模型中还可以与二向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)相联系^[6,15],在目前的场地定标方法经常使用^[7,11]。

地表反射率的测量可以采用“标准白板法”或“辐照度法”进行观测。标准白板法是通过测量地物的反射辐射亮度 $L_{\text{object}}(\theta)$ 和漫反射朗伯体的反射辐射亮度 $L_{\text{diffuser}}(\theta)$ 获得,如式(1)BRF的定义所示。辐照度法则是通过测量辐照度 E 和地物的反射辐射亮度 $L_{\text{object}}(\theta)$ 进行,由于辐照度 E 和理想漫反射朗伯体的反射辐射亮度 $L_{\text{diffuser}}(\theta)$ 存在关系: $L_{\text{diffuser}}(\theta) = E/\pi$,所以有:

$$R_{\text{BRF}}(\theta) = \pi L_{\text{object}}(\theta) / E. \quad (2)$$

地表反射率自动观测仪能够测量标准漫反射白板的反射辐射亮度、地物目标的反射辐射亮度,通过标准白板法实现地表反射率的测量。

漫总比自动观测仪本身通过测量环境漫射辐照度、环境总辐射照度,通过两者的比值获得漫总

比,但如果将两套设备的数据结合,则可以通过环境总辐射照度、地表目标的反射辐射亮度利用辐照度法实现地表反射率的测量。由于涉及到两套设备,测量采用定时触发的方式保证数据的同步性,两套设备每天均利用 GPS 单元获取世界标准时间(Coordinated Universal Time, UTC)并更新系统时钟,可以保证同步触发时间误差在 $\pm 1\text{ s}$ 内。

2.2 地表反射率自动观测系统设备

2.2.1 地表反射率自动观测仪

地表反射率自动观测仪由反射率测量与控制模块、数据采集与处理模块、环境适应性及保障模块、通讯模块、电源管理模块、安装支架等组成。

反射率测量与控制模块主要实现地表反射率测量,由光谱仪、观测光路、白板自动切换/自清洁机构等组成;数据采集与处理模块包括主控单元、光谱数据采集处理单元等内容;环境适应性及保障模块包括温控模块、太阳总辐照度辐射表、雨传感器、风速计、GPS 单元、温度传感器、白板监控单元等;电源管理模块实现整机系统的电源供应与监控,包括太阳能板、蓄电池硬件、电源电压监测/上电启动/断电控制单元等。仪器整体结构组成如图 1 所示。

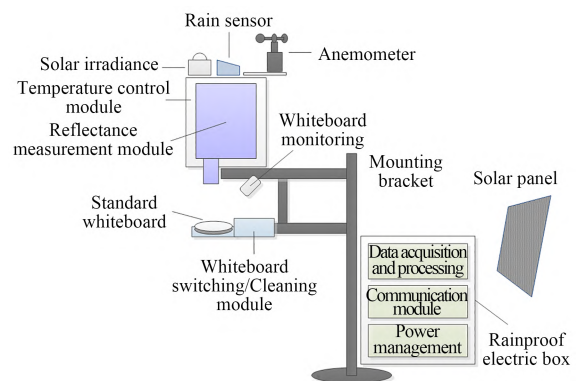


图 1 地表反射率自动观测仪的组成

Fig.1 Composition of the automatic surface reflectance monitor

地表反射率自动观测仪的技术参数如表 1 所示。

地表反射率自动观测仪外场安装于敦煌辐射校正场(场地 1 号),如图 2 所示。仪器固定牢靠,可以保证全年观测均为同一区域。四周设有围栏保护,既可以保障仪器安全,又可以避免地

表 1 地表反射率自动观测仪的技术参数

Tab. 1 Specifications of the automatic surface reflectance monitor

Spectral range	350~2 500 nm
Spectral resolution	4 nm@350~1 000 nm
	10 nm@1 000~1 900 nm
	7 nm@1 900~2 500 nm
Field of view	4°
Accuracy of reflectance measurement	0. 01 (Non-absorbing band)
Operating environment temperature	— 20~60 ℃



(a) 整体(未包含太阳能板)
(a) Overall (the solar panel is not included)



(b) 局部(白板位于测量光路中)
(b) Partial (white plate is located in the measuring optical path)

图 2 地表反射率自动观测仪外场安装实物
Fig. 2 Pictures of automatic surface reflectance monitor installation

表被人或动物践踏破坏。

2. 2. 2 漫总比自动观测仪

漫总比自动观测仪由漫总比测量与控制模块、数据采集与处理模块、环境适应性及保障模块、通讯模块、电源管理模块、安装支架等组成。

漫总比测量与控制模块主要实现地表总辐照度和漫射辐照度测量,计算生成漫总比数据,由光谱仪、辐照度观测光路、遮光球切换机构、太阳跟踪转台等组成;数据采集与处理模块包括主控单元、光谱数据采集处理单元等内容;环境适应性及保障模块包括温控模块、太阳总辐照度辐射表、雨传感器、风速计、GPS 单元、温度传感器、辐照度光度头监控单元等;电源管理模块实现整机系统的电源供应与监控,包括太阳能板、蓄电池硬件、电源电压监测/上电启动/断电控制单元等。仪器整体结构组成如图 3 所示。

漫总比自动观测仪的技术参数如表 2 所示。

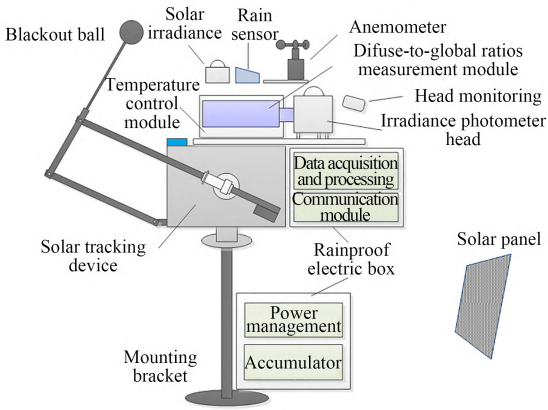


图 3 漫总比自动观测仪的组成

Fig. 3 Composition of automatic diffuse-to-global irradiance ratios monitor

表 2 地表反射率自动观测仪的技术参数

Tab. 2 Specifications of automatic diffuse-to-global irradiance ratios monitor

Spectral range	350~2 500 nm
Spectral resolution	4 nm@350~1 000 nm
	10 nm@1 000~1 900 nm
	7 nm@1 900~2 500 nm
Field of view	180°
Accuracy of diffuse-to-global ratios measurement	0. 01 (Non-absorbing band)
Operating environment temperature	— 20~60 ℃

漫总比自动观测仪外场安装于敦煌辐射校正场(场地2号),如图4所示。



(a) 整体(左侧视图)
(a) Overall (left side view)



(b) 局部(右侧视图)
(b) Partial (right side view)

图4 漫总比自动观测仪外场安装实物

Fig. 4 Pictures of automatic diffuse-to-global irradiance ratios monitor installation

2.3 地表反射率测量方法

地表反射率可以采用“标准白板法”或“辐照度法”进行测量,两种方法所需要观测的物理量有所不同,下文中将对这两种方法的测量数据进行对比,尝试探索出适合长期野外观测的实用方法。

2.3.1 标准白板法

设地表反射率自动观测仪的辐亮度定标系数为 C_f ,观测标准白板和地表目标的测量值分别

为 DN_{white} 和 DN_{field} ,则标准白板和地表目标的辐亮度为:

$$L_{\text{white}} = C_f \cdot DN_{\text{white}}, L_{\text{field}} = C_f \cdot DN_{\text{field}}. \quad (3)$$

设标准白板和地表目标的反射率分别为 R_{white} 和 R_{field} ,由式(1)可知:

$$R_{\text{field}} = \frac{L_{\text{field}}}{L_{\text{diffuser}}} = \frac{L_{\text{field}}}{\frac{L_{\text{white}}}{R_{\text{white}}}} = \frac{DN_{\text{field}}}{DN_{\text{white}}} \cdot R_{\text{white}}. \quad (4)$$

从式(4)中可以看出,辐亮度定标系数为 C_f 已在计算过程中被约去,说明光谱仪的响应度真值是不重要的,即使响应度发生缓慢改变也不影响反射率测量精度,地表反射率测量结果的精度直接溯源于标准白板的反射率 R_{white} ,减少了定标传递环节。

地表反射率自动观测仪所采用的标准白板,其反射率由中国计量科学研究院定标。测量几何条件为垂直/漫射(0/d),校准设备为:光谱反射比量值复现装置,反射比不确定度 0.44% ($k=2$);近红外漫反射比标准工作板,反射比不确定度 0.69% ($k=2$);(双光束)紫外可见近红外分光光度计,准确度等级 I 级。反射率校准结果如图 5 所示,平均反射率为 97.2%,校准结果绝对不确定度为 1.0% ($k=2$)。

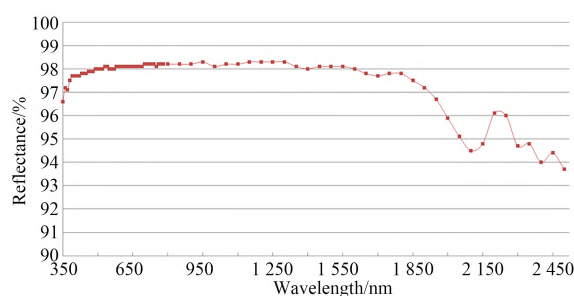


图5 标准白板反射率曲线

Fig. 5 Diagram of the standard whiteboard reflectance

2.3.2 辐照度法

设漫总比自动观测仪的辐照度定标系数为 C_m ,观测环境总辐射照度的测量值为 DN_{irr} ,则对环境总辐射照度 E_{irr} 有:

$$E_{\text{irr}} = C_m \cdot DN_{\text{irr}}. \quad (5)$$

由式(2)可知,对标准白板的反射率 R_{white} 有:

$$R_{\text{white}} = \pi L_{\text{white}} / E_{\text{irr}} = \pi \frac{C_f \cdot DN_{\text{white}}}{C_m \cdot DN_{\text{irr}}}. \quad (6)$$

令 $R_{\text{im}} = C_f / C_m$,则有:

$$R_{\text{fm}} = DN_{\text{irr}} / DN_{\text{white}} \cdot \pi R_{\text{white}} \quad (7)$$

同样的,对地表目标的反射率 R_{field} 有:

$$R_{\text{field}} = \pi L_{\text{field}} / E_{\text{irr}} = \pi \frac{C_{\text{f}} \cdot DN_{\text{field}}}{C_{\text{m}} \cdot DN_{\text{irr}}} = \frac{DN_{\text{field}} / DN_{\text{irr}} \cdot \pi R_{\text{fm}}}{C_{\text{f}} / C_{\text{m}}} \quad (8)$$

将式(8)与式(4)相比较,可将 R_{fm} 视为辐照度法的反射率定标系数。

一般来说,短期内地表反射率自动观测仪的辐亮度定标系数为 C_{f} 和漫总比自动观测仪的辐照度定标系数为 C_{m} 是稳定值,反射率定标系数 R_{fm} 也应当是稳定值。因此,该系数可利用式(7)通过在同一外场辐射条件下,地表反射率自动观测仪测量标准白板,并同时漫总比自动观测仪测量环境总辐射照度来获得。下文中将选择晴朗少云天气,通过外场实测获得该反射率定标系数 R_{fm} 。

由式(7)和式(8)可知,定标系数 R_{fm} 已取代辐亮度定标系数 C_{f} 和辐照度定标系数 C_{m} ,地表反射率的测量精度同样溯源于标准白板的反射率 R_{white} 。

3 地表反射率外场数据分析与验证

地表反射率自动观测系统外场安装完成后,开始地表反射率的自动化无人执守测量。以下分析中所采用的数据获取时间为2021年1月至11月,选用数据均为正午时分(地方时)附近的数据,以保证太阳辐射在方位角上的一致性减少影响因素。

3.1 地表反射率测量精度

为评估地表反射率的测量精度,取初始测量的前3天正午时分(地方时)的数据,并分别采用标准白板法和辐照度法进行计算地表反射率。系统在测量模式下自动测量时,测量标准白板辐亮度、地表目标辐亮度、环境总辐射照度的光谱采样时间均为5 s,现场测量频次为2 min一次,持续测量。由于光谱范围比较宽,核心测量模块具有3个探测器:Si, InGaAs和扩展 InGaAs探测器,分别进行 $(35 \pm 1)^\circ\text{C}$, $(-5 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 和 $(-10 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 的温控以保证测量稳定性。

冬季至夏季敦煌正午太阳高度角变化范围为 $26.1^\circ \sim 73.1^\circ$,如图6所示。由于标准白板并非理想的郎伯漫反射,需要根据太阳高度角的变

化对白板反射率进行郎伯校正,参照文献^[16-17]中的数据,本文所采用的郎伯校正系数曲线如图7所示,不同高度角下的校正系数采用插值方式得到。

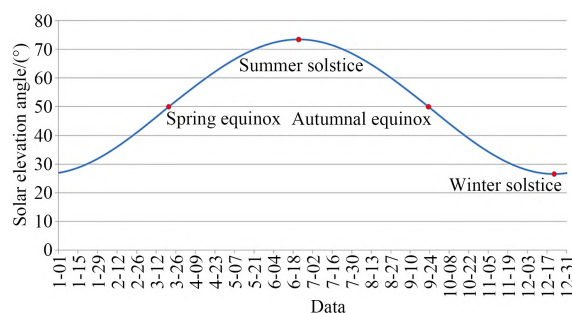


图6 敦煌一年正午太阳高度角变化曲线

Fig. 6 Annual variation curve of noon solar elevation angle in Dunhuang

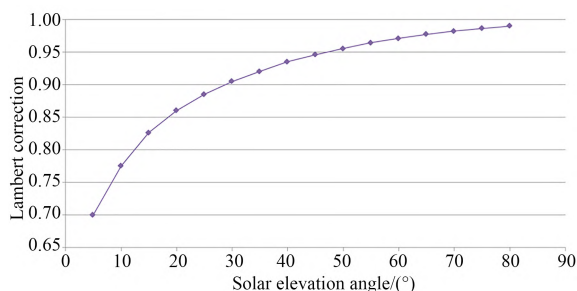


图7 不同太阳高度角下的郎伯校正系数

Fig. 7 Lambert correction coefficients at different solar elevation angles

在测量开始第1天,通过采用标准白板法实测地表的反射率,如图8所示,图题中的 E_i 为太阳高度角、 A_z 为太阳方位角,并通过2.3.2节种所述方法进行外场同时观测,获得了如图9所示

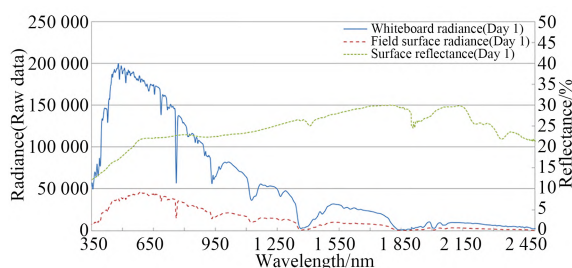


图8 标准白板法场地实测反射率曲线(第1天, $E_i = 27.94^\circ$, $A_z = 183.72^\circ$)

Fig. 8 Measured reflectance of the field by whiteboard method (Day 1, $E_i = 27.94^\circ$, $A_z = 183.72^\circ$)

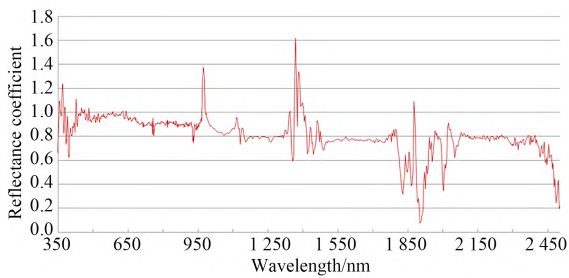


图 9 辐照度法反射率定标系数
Fig. 9 Reflectance coefficient of irradiance method

的辐照度法反射率定标系数。
从式(7)可知,辐照度法反射率定标系数的相对不确定度表达式为:

$$\sigma_{R_{\text{im}}} = \sqrt{\sigma_{D_{N_{\text{ir}}}}^2 + \sigma_{D_{N_{\text{white}}}}^2 + \sigma_{R_{\text{white}}}^2}, \quad (9)$$

其中: $\sigma_{D_{N_{\text{ir}}}}$ 和 $\sigma_{D_{N_{\text{white}}}}$ 分别为光谱仪测量辐照度和白板辐亮度的相对不确定度, $\sigma_{R_{\text{white}}}$ 为标准白板的反射率相对不确定度。辐亮度和辐照度测量不确定度通过采用光谱测量模块连续测量 10 次标准白板辐亮度,利用标准差/平均值的方法获得,如图 10 所示。从图中可以看出,绝大多数光谱范围内(非吸收波段),相对不确定度均 $\leq 0.5\%$ 。辐照度法反射率定标系数不确定度如表 3 所示。

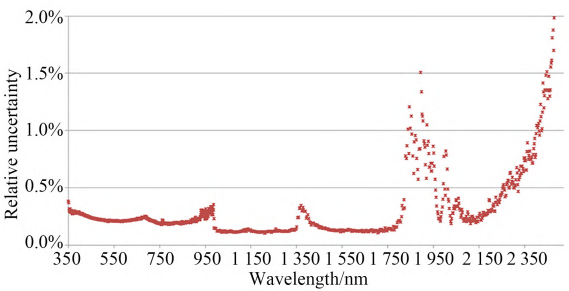


图 10 光谱测量模块的相对不确定度
Fig. 10 Relative uncertainty of spectral measurement module

表 3 辐照度法反射率定标系数不确定度	
Tab. 3 Uncertainty of the coefficient of irradiance method	
Relative uncertainty of reflectance of whiteboard	1.029%
Lambert correction of whiteboard	≤ 0.005
Relative uncertainty of radiance measurement	$\leq 0.5\%$
Relative uncertainty of irradiance measurement	$\leq 0.5\%$
Composite relative uncertainty	$\leq 1.345\%$

采用标准白板法第 2 天、第 3 天的反射率测量结果如图 11(a)、图 11(b)所示。以第 1 天标准白板法测量的地表反射率为标准,通过比较验证其测量稳定性,如图 12(a)、图 12(b)所示,若不考虑大气吸收带(约 1 350~1 450 nm 和 1 800~1 950 nm)区域,反射率整体差异分别为 $(0.036\pm 0.238)\%$ 和 $(0.130\pm 0.273)\%$ ($k=2$),地表反射率最大偏差为 0.403% ($k=2$)。

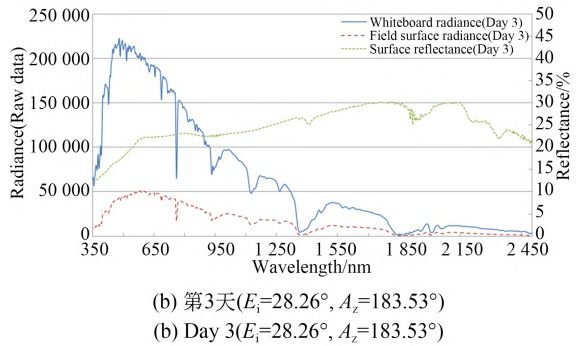
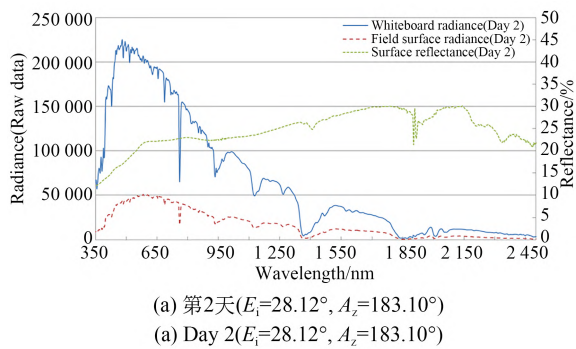
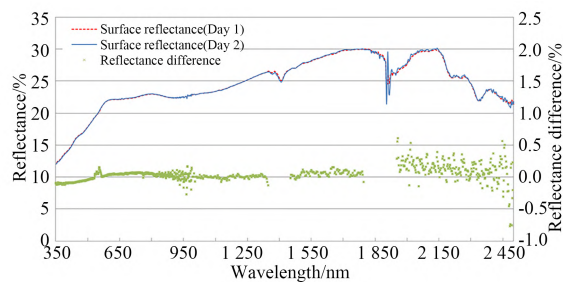


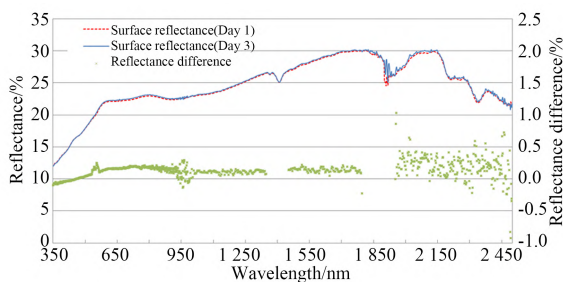
图 11 标准白板法场地实测反射率曲线
Fig. 11 Measured reflectance of field by whiteboard method

从图 12 中的数据可知,标准白板法在整个 350~2 500 nm 测量光谱范围内,3 天内短期测量数据的稳定性极好,反射率的测量曲线连续、平滑、抖动少,均值偏差仅为 0.130%。

采用辐照度法第 2 天、第 3 天的反射率测量结果如图 13(a)和图 13(b)所示。以第 1 天标准白板法测量的地表反射率为标准,通过比较验证其测量稳定性,如图 14 所示,若不考虑大气吸收带区域,反射率整体差异分别为 $(0.197\pm 1.153)\%$ 和 $(0.323\pm 1.277)\%$ ($k=2$),地表反射率最大偏差为 1.600% ($k=2$);350~1 900 nm 光谱范围差异分别为 $(0.183\pm 0.482)\%$ 和



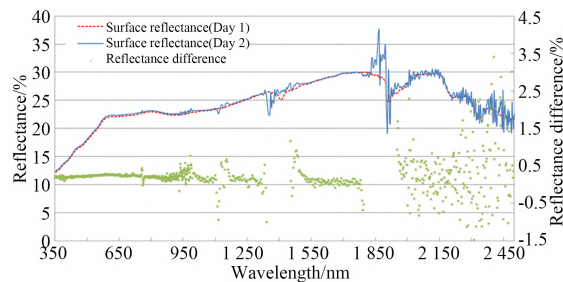
(a) 第2天
(a) Day 2



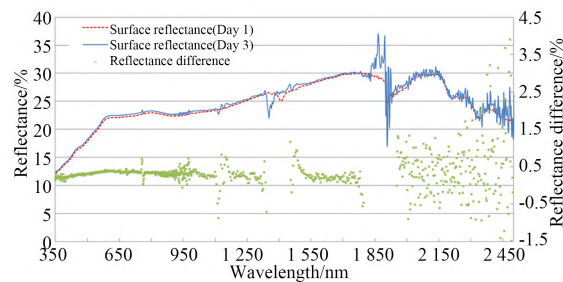
(b) 第3天
(b) Day 3

图 12 反射率曲线差异比较

Fig. 12 Difference comparison of surface reflectance



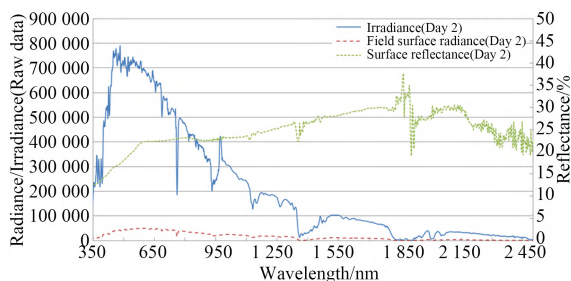
(a) 第2天
(a) Day 2



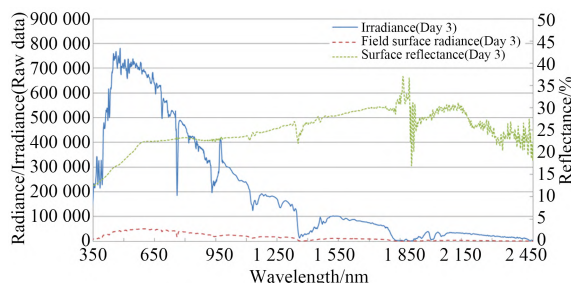
(b) 第3天
(b) Day 3

图 14 反射率曲线差异比较

Fig. 14 Difference comparison of surface reflectance



(a) 第2天 ($E_i=28.12^\circ, A_z=183.10^\circ$)
(a) Day 2 ($E_i=28.12^\circ, A_z=183.10^\circ$)



(b) 第3天 ($E_i=28.26^\circ, A_z=183.53^\circ$)
(b) Day 3 ($E_i=28.26^\circ, A_z=183.53^\circ$)

图 13 辐照度法场地实测反射率曲线

Fig. 13 Measured reflectance of field by irradiance method

(0.282 ± 0.462)% ($k=2$), 1 900~2 500 nm 光谱范围差异分别为 (0.236 ± 2.131)% 和 (0.443 ± 2.392)% ($k=2$)。

从图 14 中的曲线可知,辐照度法亦表现良好,在 350~1 900 nm 光谱范围与标准白板法具有相近的稳定性,3 天内短期测量数据的均值偏差为 0.236%。在 1 900~2 500 nm 光谱范围,反射率数据曲线出现了上下波动的现象,这是由于红外光辐亮度较弱和 InGaAs 探测器固有热噪声造成的,但整体均值偏差不大,为 0.443%。

从式(4)可知,标准白板法获取地表反射率的绝对不确定度表达式为:

$$\sigma_{\text{field}} = \sqrt{\sigma_{DN_{\text{field}}}^2 + \sigma_{DN_{\text{white}}}^2 + \sigma_{R_{\text{white}}}^2} \cdot R_{\text{field}}, \quad (10)$$

其中, $\sigma_{DN_{\text{field}}}$ 为光谱仪测量地表的辐亮度相对不确定度。

从式(8)可知,辐照度法获取地表反射率的绝对不确定度表达式为:

$$\sigma_{R_{\text{field}}} = \sqrt{\sigma_{DN_{\text{field}}}^2 + \sigma_{DN_{\text{ir}}}^2 + \sigma_{R_{\text{in}}}^2} \cdot R_{\text{field}}. \quad (11)$$

从上文测量数据可知,地表反射率 R_{field} 最大值 ≤ 0.35 ,两种方法的不确定度分析如表 4 所示。标准白板法和辐照度法的地表反射率测量精度

表 4 反射率测量不确定度
Tab. 4 Uncertainty of reflectance measurement

Standard whiteboard method		Irradiance method	
Relative uncertainty of reflectance of whiteboard	1. 029%	Relative uncertainty of reflectance calibration coefficient	≤1. 345%
Lambert correction of whiteboard	≤0. 005	Relative uncertainty of surface radiance measurement	≤0. 5%
Relative uncertainty of whiteboard radiance measurement	≤0. 5%	Relative uncertainty of irradiance measurement	≤0. 5%
Relative uncertainty of surface radiance measurement	≤0. 5%	Composite relative uncertainty	≤1. 520%
Composite relative uncertainty	≤1. 345%	Composite absolute uncertainty	≤0. 005 3
Composite absolute uncertainty	≤0. 004 7		

达到了≤0. 01 水平。

3. 2 地表反射率长期测量稳定性

随着测量时间的增加,无论标准白板法还是辐照度法,其与第 1 天测量的地表反射率的差异均有少量增加,说明标准白板的表面和辐照度光度头的石英球罩正在逐渐受到外场风沙的污染,导致它们的反射率和透过率有所下降。

为进一步确认和验证地表反射率自动测量系统的长期稳定性,取外场测量的第 30 天、第 100 天、第 200 天和第 301 天正午时分(地方时)的数据,并分别采用标准白板法和辐照度法进行计算地表反射率。

采用标准白板法得到的反射率测量结果如图 15(a)~15(d)所示。以第 1 天标准白板法测量的地表反射率为标准,通过比较进行分析验证其长期测量稳定性,如图 16(a)~16(d)所示。若不考虑大气吸收带区域,反射率差异分别为(2. 101±1. 019)%, (3. 444±1. 511)%, (3. 455±1. 468)% 和(2. 706±2. 938)% ($k=2$)。

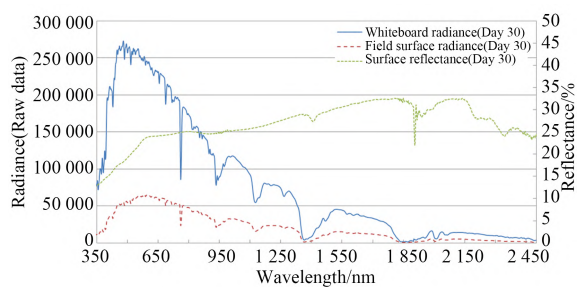
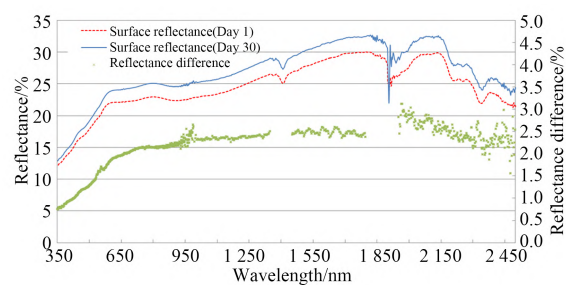
从图 15 中的反射率曲线可以看出,标准白板法在整个 350~2 500 nm 测量光谱范围内仍然保持着连续、平滑、抖动少的特点,但是从图 16 中的反射率差异数据比较可知,整体出现了反射率漂移、反射率增大,并且 600 nm 之前,漂移量随波长的减小而增加。到第 301 天时,350~600 nm 波段反射率平均漂移(4. 996±3. 449)% ($k=2$), 600~2 500 nm 波段反射率平均漂移(2. 104±0. 446)% ($k=2$)。尤其是 350 nm 漂移量已达到

了的 8. 247%。

采用辐照度法得到的反射率测量结果如图 17(a)~17(d)所示。以第 1 天标准白板法测量的地表反射率为标准,通过比较进行分析验证其长期测量稳定性,如图 18(a)~18(d)所示,若不考虑大气吸收带区域,反射率差异分别为(0. 121±1. 846)%, (0. 726±2. 826)%, (0. 417±2. 840)% 和(0. 735±2. 781)% ($k=2$)。

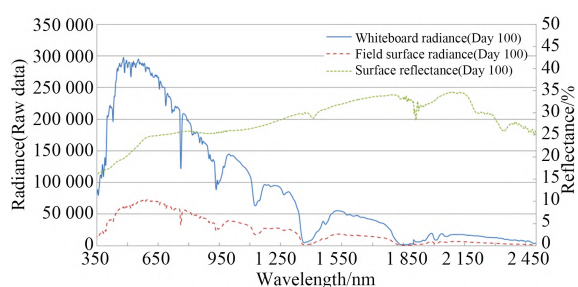
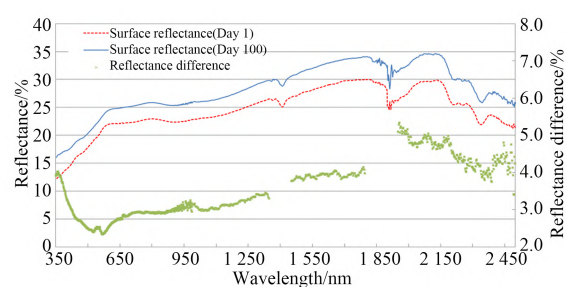
从图 18 中的曲线可知,辐照度法获得的反射率曲线整体与初期保持基本一致,整体平均漂移小于 1%。但在局部区域,反射率亦表现出较大的偏差,如 350 nm 附近,反射率亦增大了 3. 1% 左右。在 350~1 900 nm 光谱范围,在第 100 天后就出现了较大幅度的上下抖动,反射率曲线不再平滑。典型表现为 760 nm 附近的氧气吸收带区域出现了一个约 3% 的尖峰,这可能是由于设备长期处于野外环境下,环境温度变化、昼夜温差交替等原因,使分别观测地表目标的辐亮度和观测环境总辐射照度的两台光谱仪在一些波段出现了响应度的改变和波长漂移,但辐照度法仍然沿用初期的反射率定标系数,导致产生反射率测量偏差。

地表反射率长期随时间变化的曲线如图 19 所示,图中数据为取 1 个波长(650 nm)每天正午时分的 5 个测量数据,分别采用标准白板法和辐照度法得到地表反射率。从图中可以看出,反射率变化趋势与上文分析基本相同,标准白板法存在漂移,辐照度法则相对稳定一些。

(a) 第30天($E_i=35.01^\circ$, $A_z=181.63^\circ$)(a) Day 30($E_i=35.01^\circ$, $A_z=181.63^\circ$)

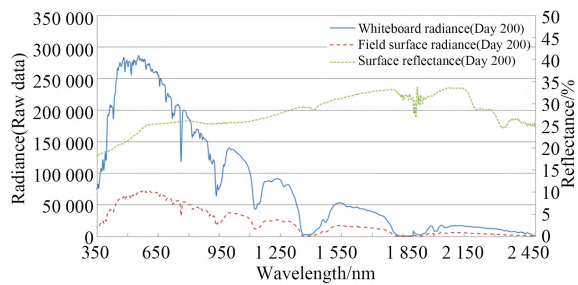
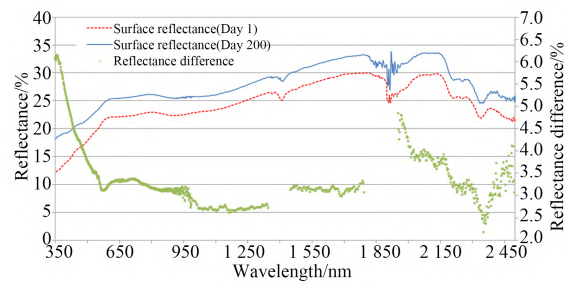
(a) 第30天

(a) Day 30

(b) 第100天($E_i=60.75^\circ$, $A_z=181.36^\circ$)(b) Day 100($E_i=60.75^\circ$, $A_z=181.36^\circ$)

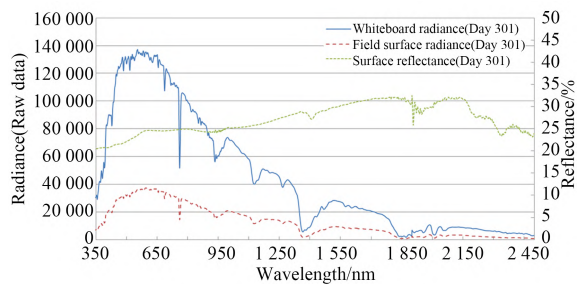
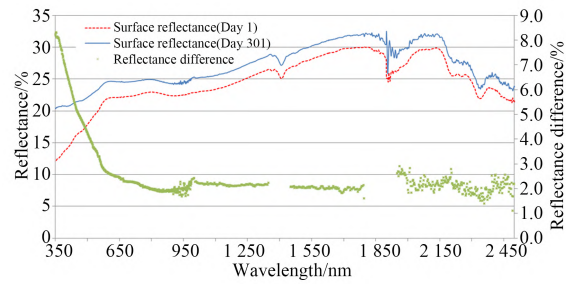
(b) 第100天

(b) Day 100

(c) 第200天($E_i=60.94^\circ$, $A_z=179.88^\circ$)(c) Day 200($E_i=60.94^\circ$, $A_z=179.88^\circ$)

(c) 第200天

(c) Day 200

(d) 第301天($E_i=31.59^\circ$, $A_z=180.18^\circ$)(d) Day 301($E_i=31.59^\circ$, $A_z=180.18^\circ$)

(d) 第301天

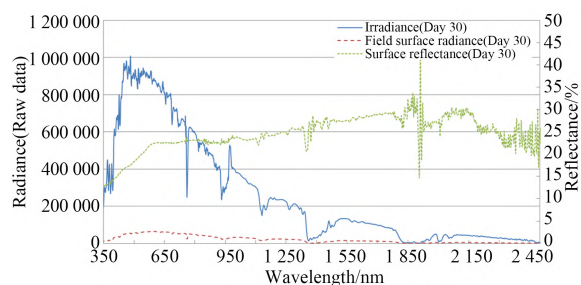
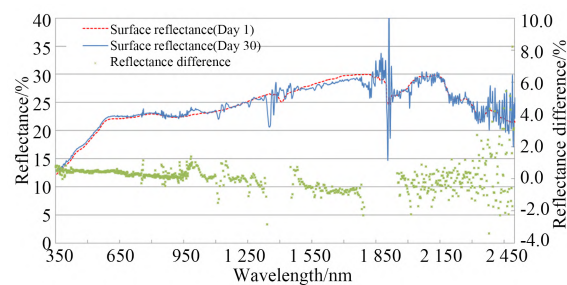
(d) Day 301

图 15 标准白板法场地实测反射率曲线

Fig. 15 Measured reflectance of field by whiteboard method

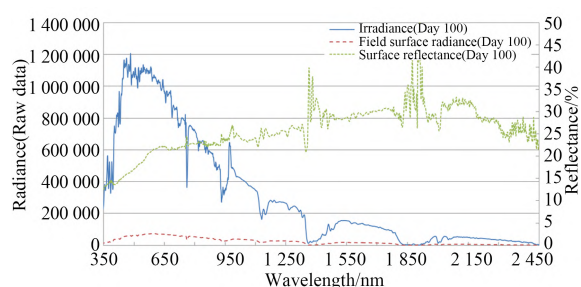
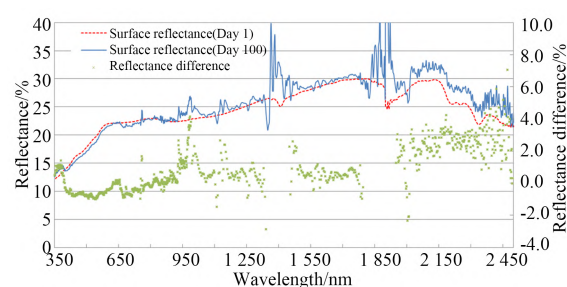
图 16 反射率曲线差异比较

Fig. 16 Difference comparison of surface reflectance

(a) 第30天($E_i=35.01^\circ$, $A_z=181.63^\circ$)(a) Day 30($E_i=35.01^\circ$, $A_z=181.63^\circ$)

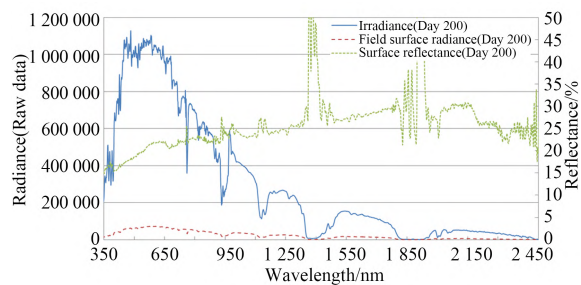
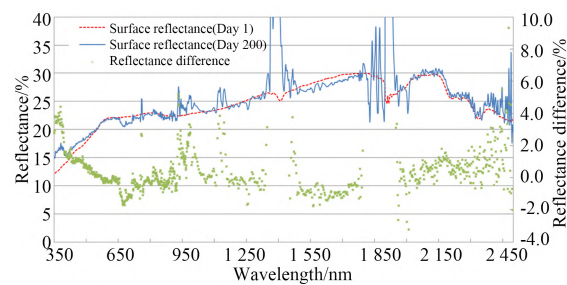
(a) 第30天

(a) Day 30

(b) 第100天($E_i=60.75^\circ$, $A_z=181.36^\circ$)(b) Day 100($E_i=60.75^\circ$, $A_z=181.36^\circ$)

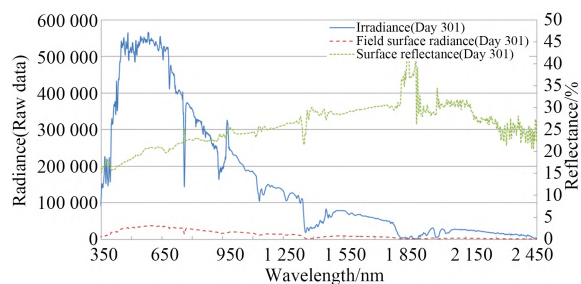
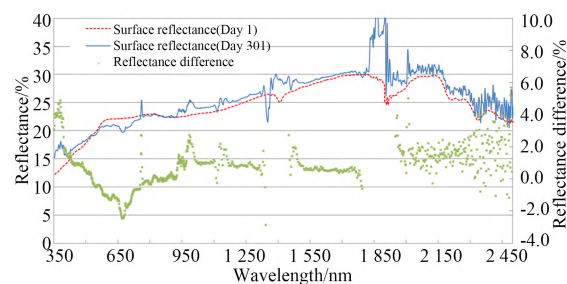
(b) 第100天

(b) Day 100

(c) 第200天($E_i=60.94^\circ$, $A_z=179.88^\circ$)(c) Day 200($E_i=60.94^\circ$, $A_z=179.88^\circ$)

(c) 第200天

(c) Day 200

(d) 第301天($E_i=31.59^\circ$, $A_z=180.18^\circ$)(d) Day 301($E_i=31.59^\circ$, $A_z=180.18^\circ$)

(d) 第301天

(d) Day 301

图 17 辐照度法场地实测反射率曲线

Fig. 17 Measured reflectance of field by irradiance method

图 18 反射率曲线差异比较

Fig. 18 Difference comparison of surface reflectance

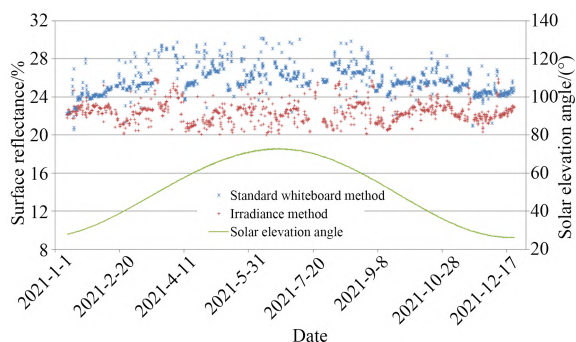


图 19 反射率随时间变化曲线

Fig. 19 Difference comparison of surface reflectance

3.3 测量方法分析比较

从以上两个小节的数据可以发现,标准白板法中,通过地表反射率自动观测仪的同一个光谱仪分别观测标准白板和地表目标,可以抵消光谱仪自身响应度漂移,地表反射率直接溯源到标准白板,测量反射率曲线平滑、连续,短期测量数据的稳定性极好,地表反射率均值偏差仅为 0.130%。但存在标准白板表面易受污染,造成反射率偏大的问题,长期测量反射率 350~600 nm 波段平均漂移为 4.996%,600~2 500 nm 波段平均漂移 2.104%。因此,标准白板的洁净程度是保证长期观测准确性和稳定度的关键。目前地表反射率自动观测仪虽然配备了白板自动切换/自清洁机构,但从外场数据结果来看显然仍不能令人满意,可以考虑通过增加人为清洗等手段来保证标准白板的清洁,从而大幅提高地表反射率测量精度。

辐照度法通过地表反射率自动观测仪和漫总比自动观测仪两个设备中各自的光谱仪分别观测标准白板和地表目标,短期测量与标准白板法具有相近的性能,地表反射率均值偏差 350~1 900 nm 波段为 0.236%,1 900~2 500 nm 波段为 0.443%。长期测量数据显示,由于采用的辐照度头外形为半球形、光洁度高、不易受风沙污染,地表反射率整体漂移小,长期测量反射率平均漂移为 0.735%。但由于采用了两台光谱仪,长期观测时受光谱仪间响应度改变、波长漂移影响,反射率曲线易产生不平滑、局部具有更多的噪声等问题。虽然该问题可通过外场实测重新获取反射率定标系数来解决,但反射率定标系数的精度又取决于标准白板的反射率精度,而在外

场同样执行测量任务的地表反射率自动观测仪的标准白板存在风沙污染的问题,不能保证白板反射率的准确性,从而无法周期性的自动获取反射率定标系数。可以考虑在人为清洗地表反射率自动观测仪的标准白板后,及时外场实测进行获取反射率定标系数,以提高反射率测量精度。

综上,标准白板法具有地表反射率曲线平滑、连续的优点,但存在长期测量漂移大的缺点;辐照度法具有地表反射率整体漂移小的优点,但存在曲线抖动、局部噪声大的缺点。因此,可以通过两者结合,扬长避短,互为补充:以标准白板法的地表反射率测量数据为主,通过辐照度法的测量数据对漂移量进行修正,这样即保证了曲线平滑,又修正了反射率漂移,获得了更为准确的地表反射率数据。以第 30 天、第 100 天、第 200 天和第 301 天标准白板法的地表反射率数据为例,通过与辐照度法的测量数据对比,可估算出漂移量约为 1.6%,2.8%,3.0% 和 2.0%,采用反射率曲线整体减去该偏移量的方法进行校正,校正后的地表反射率曲线如图 20 所示,可以看出,校正后的曲线重合度得到提高,反射率差异大幅减小。

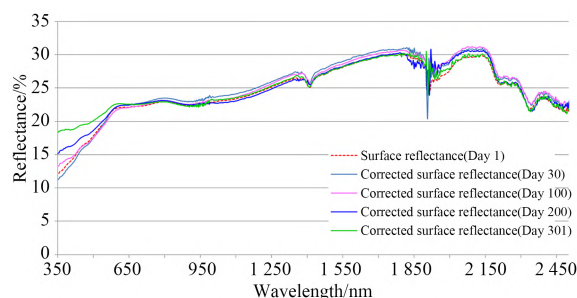


图 20 地表反射率校正

Fig. 20 Surface reflectance correction

4 结 论

本文介绍了地表反射率自动观测系统的原理和系统组成,将观测系统安装于敦煌辐射校正场,实现外场无人值守自动化、无间断的获取地表光谱反射率。采用标准白板法和辐照度法两种测量方法获取地表反射率,结果均溯源至经计量标定的标准白板反射率,减少了定标传递环

节。并对两种测量方法获取的地表反射率数据分别进行了短期和长期稳定性的对比分析,结果表明:两种方法的短期测量数据的稳定性都很高,标准白板法测量地表反射率短期均值偏差为 0.130%,长期测量 350~600 nm 波段均值偏差为 4.996%,600~2 500 nm 波段均值偏差为 2.104%;辐照度法短期测量 350~1 900 nm 波段均值偏差为 0.236%,1 900~2 500 nm 波段均值

偏差为 0.443%,长期测量地表反射率整体漂移小,平均漂移为 0.735%。标准白板法测量地表反射率合理可行,测量曲线连续、平滑、抖动少,但易受风沙污染,可通过人为定期清洁标准白板提高测量准确性。辐照度法长期测量地表反射率整体漂移小,但存在反射率曲线不平滑、局部噪声大的缺点。可将两种方法相结合,获得更为准确的地表反射率数据。

参考文献:

- [1] 夏志伟,王凯,方伟,等. 基于航天单色仪的在轨辐射定标应用与发展[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1880-1891.
XIA ZH W, WANG K, FANG W, *et al.* Application and development of radiation calibration in orbit based on space monochromator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1880-1891. (in Chinese)
- [2] 王龙,蔺超,纪振华,等. 碳卫星 CO₂ 探测仪发射前的漫反射板定标[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1967-1976.
WANG L, LIN C, JI Z H, *et al.* Preflight diffuser's calibration of carbon dioxide spectrometer of Tan-Sat[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(8): 1967-1976. (in Chinese)
- [3] 齐向东,撒芃芃,潘明忠,等. 凸面光栅成像光谱仪的光谱定标[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2870-2876.
QI X D, HAN P P, PAN M Z, *et al.* Spectral calibration of imaging spectrometer with convex grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2870-2876. (in Chinese)
- [4] 李传荣,马灵玲,唐伶俐,等. 面向定量遥感的高分辨遥感综合定标场及其应用[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 198-219.
LI C R, MA L L, TANG L L, *et al.* A comprehensive calibration site for high resolution remote sensors dedicated to quantitative remote sensing and its applications [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2021, 25(1): 198-219. (in Chinese)
- [5] 韩启金,傅俏燕,张学文,等. 高分一号卫星宽视场成像仪的高频次辐射定标[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1707-1714.
HAN Q J, FU Q Y, ZHANG X W, *et al.* High-frequency radiometric calibration for wide field-of-view sensor of GF-1 satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7): 1707-1714. (in Chinese)
- [6] 顾行发,田国良,余涛. 航天光学遥感器辐射定标原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
GU X F, TIAN G L, YU T. *Principle and Method of Radiation Calibration for Space Optical Remote Sensor* [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [7] 李元,戎志国,郑照军,等. FY-3A 扫描辐射计的可见近红外通道在轨场地定标[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 2966-2974.
LI Y, RONG Z G, ZHENG Z J, *et al.* Post launch site calibration of visible and near-infrared channels of FY-3A visible and infrared radiometers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 2966-2974. (in Chinese)
- [8] 赵维宁,胡秀清,方伟,等. 卫星光学仪器辐射交互定标方法的应用和发展[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1921-1931.
ZHAO W N, HU X Q, FANG W, *et al.* Development and applications of intercalibration for satellite optical instruments [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1921-1931. (in Chinese)
- [9] 吕佳彦,何明元,陈林,等. 基于敦煌辐射校正场的自动化辐射定标方法[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0801003.
LV J Y, HE M Y, CHEN L, *et al.* Automated radiation calibration method based on Dunhuang radiometric calibration site [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0801003. (in Chinese)
- [10] 杨敏,刘照言,赵永光,等. 基于包头场 TOA 反射率的卫星在轨辐射定标方法[J]. 光学学报, 2021, 41(18): 1828001.
YANG M, LIU Z Y, ZHAO Y G, *et al.* On-orbit radiometric calibration method for satellites based on TOA reflectance at Baotou site [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(18): 1828001. (in Chinese)
- [11] 包诗薇,陈洪耀,张黎明,等. 基于灰阶靶标的光

- 学遥感器绝对辐射定标及反射率反演验证[J]. 光学学报, 2021, 41(4): 0428001.
- BAO S W, CHEN H Y, ZHANG L M, *et al.* Absolute radiometric calibration of optical remote sensor based on gray-scale targets method and reflectance inversion validation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(4): 0428001. (in Chinese)
- [12] 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.
- 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. (in Chinese)
- [13] 陶炳成, 胡秀清, 杨磊库, 等. 无人机平台的沙漠场地 BRDF 特征观测方法及建模[J]. 遥感学报, 2021, 25(9): 1964-1977.
- TAO B CH, HU X Q, YANG L K, *et al.* BRDF feature observation method and modeling of desert site based on UAV platform [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2021, 25(9) : 1964-1977. (in Chinese)
- [14] 何兴伟, 胡秀清, 何灵莉, 等. 我国西北部沙漠定标场网的地表反射率光谱特征模型[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0628003.
- HE X W, HU X Q, HE L L, *et al.* Surface reflectance spectral characteristic model of desert calibration site network in northwest China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6) : 0628003. (in Chinese)
- [15] 程娟. 高空间分辨率影像 BRF 构建及 BRDF 遥感反演研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2019.
- CHENG J. *Construction of BRF and Inversion of Land Surface BRDF Using High Spatial Resolution Remote Sensing Image*[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [16] BHANDARI A, HAMRE B, FRETTE Ø, *et al.* Bidirectional reflectance distribution function of Spectralon white reflectance standard illuminated by incoherent unpolarized and plane-polarized light [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(16): 2431.
- [17] BERNAD B, FERRERO A, STROTHKÄMPER C, *et al.* Deviation of white diffuse reflectance standards from perfect reflecting diffuser at visible and near-infrared spectral ranges [J]. *Metrologia*, 2019, 56(5): 055005.

作者简介:



夏志伟(1982—),男,河南永城人,硕士,助理研究员,2006年于哈尔滨工业大学获理学学士学位,2012年于哈尔滨工业大学获工学硕士学位,主要从事光学系统设计、辐射定标方面的研究。E-mail: xiazw@ciomp. ac. cn

通讯作者:



王玉鹏(1972—),男,山东沂水人,博士,研究员,主要从事空间遥感技术、精密太阳跟踪、太阳光谱及总辐射测量等方面的研究。E-mail: wangyp@ciomp. ac. cn