

基于场地自动化观测技术的遥感器在轨辐射定标试验与分析

邱刚刚^{1,2} 李 新¹ 韦 玮^{1,2} 张 权^{1,2} 郑小兵¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所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 230031

摘要 采用自动化场地辐射计(ATR)测量地表反射,结合 CE318 型太阳光度计获得的大气参数和漫总比辐照度仪获得的漫总比数据,计算出卫星过顶时刻的高光谱地表反射率。基于反射率基法对中分辨率成像光谱仪(MODIS)/Aqua 和 MODIS/Terra 的可见光至近红外波段 1~7 开展了场地自动化观测绝对辐射定标试验。结果表明,利用场地自动化观测定标方法获取的表观辐亮度与 MODIS/Aqua、MODIS/Terra 星上获取的表观(TOA)辐亮度的相对偏差不大于 4%。这说明场地自动化观测定标方法与人工定标方法具有同等水平的定标精度,验证了场地自动化观测定标方法的可行性。

关键词 大气光学; 辐射定标; 反射率基法; 自动化观测

中图分类号 TP722.4; TP722.5; TP721.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0701001

Experiment and Analysis of On-Orbit Radiometric Calibration for Remote Sensors Based on In-Site Automated Observation Technology

Qiu Ganggang^{1,2} Li Xin¹ Wei Wei^{1,2} Zhang Quan^{1,2} Zheng Xiaobing¹

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

² University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract By means of measuring the surface reflectance by an automated test-site radiometer (ATR), measuring the atmospheric parameters by CE318 sun-photometer, and measuring the diffuser-to-globe factor by the diffuser-to-globe irradiance meter, a hyperspectral surface reflectance at the time of overpass is determined. Based on the reflectance-based method, absolute radiometric calibration experiments with in-site automated observation at visible to near-infrared bands 1-7 of the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS)/Aqua and MODIS/Terra are performed. The results show that the relative deviation in top-of-atmosphere (TOA) spectral radiances is less than 4% obtained from the in-site automated observation radiometric calibration (AORC) method and from MODIS/Aqua and MODIS/Terra, which indicates the in-site AORC method is at the same level of calibration accuracy with the manual calibration methods. The feasibility of the in-site AORC method is testified.

Key words atmospheric optics; radiometric calibration; reflectance-based method; automated observation

OCIS codes 010.0280; 120.0280; 010.0280; 030.5620; 240.6700

1 引 言

遥感器的绝对辐射定标是遥感定量化应用的基本前提和关键技术之一,其精度直接影响到定量遥感产品的质量^[1-2]。经过近二十年的发展,我国形成了以反射率基法为主的人工跑场场地定标系统^[3]。卫星定标

收稿日期: 2015-11-23; **收到修改稿日期:** 2016-01-20

基金项目: 国家 863 计划(2015AA123702)、国家自然科学基金(11204318,61275173,41271373)、安徽省自然科学基金青年项目(1508085QD80)

作者简介: 邱刚刚(1988—),男,博士研究生,主要从事光学精确测量技术方面的研究。E-mail: qiugg@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 郑小兵(1969—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光辐射测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标、光学遥感和光学海洋学等方面的研究。E-mail: xzbheng@aiofm.ac.cn (通信联系人)

场一般位于戈壁、沙漠等偏远地区,完成一次试验需要耗费大量的人力、物力和时间,同时受天气条件的制约^[4-5],目前我国的场地定标试验基本维持在每年一次的频率,因此难以提供及时和充足的样本数据来判断载荷的衰变情况。随着光学遥感器数量、种类的增加和对定标精度要求的提高,人工方式的场地定标难以满足当前的应用需求^[6]。

近年来,国际上提出了自动化定标的思路,采用无人值守的自动化观测设备获取场地的地表和大气参数数据,实现对遥感器高频次、高实效的定标^[4-6]。法国国家空间技术中心利用 La Crau 定标场^[7]、美国喷气推进实验室利用水星镇干涸的湖床定标场^[8]、亚利桑那大学在 RadCaTS (Radiometric Calibration Test Site)^[4-5]均开展了特定波段的自动化定标试验,初步结果表明,自动化定标可以达到人工场地定标的精度^[8],并且在提高定标频次、降低定标成本和减少对场地破坏等方面具有明显优势。根据我国的卫星发展形势,中国气象局国家卫星气象中心在敦煌辐射校正场投入使用了自动化定标基础设施,为自动化定标研究的开展奠定了基础。中国科学院安徽光学精密机械研究所(安光所)在敦煌辐射校正场布设了多台自动化设备^[6],开展了卫星自动化观测辐射定标(AORC)试验,并取得了初步成功。

本文介绍了场地自动化观测定标的原理,基于 2015 年敦煌辐射校正场的定标试验分析了场地自动化观测定标方法,以及观测了设备的基本情况和数据获取情况。基于反射率基法获取了中分辨率成像光谱仪(MODIS)/Aqua 和 MODIS/Terra 可见近红外波段(Band 1~7)的表观辐亮度并与星上数据进行了对比,结果验证了场地自动化观测定标方法的可行性,该研究为进一步实现自动化定标的业务化运行奠定了基础。

2 场地自动化观测定标

2.1 场地自动化观测定标技术流程

场地自动化观测定标方法在原理上采用反射率基法,与传统的人工方式场地定标法相比,定标参数获取的自动化、高频次和长序列的特点突出,定标技术流程也相应发生了变化,如图 1 所示。首先,采用通道式自动化场地辐射计(ATR)自动测量地表辐亮度,结合大气光学参数的自动观测,计算出地表多光谱反射率;根据地表多光谱反射率与跑场测量的场地平均高光谱地表反射率之间的关系,获取卫星过顶时刻的高光谱地表反射率。其次,通过星地光谱匹配,将高光谱地表反射率与同步测量得到的大气参数输入到 6S(Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum)辐射传输模型,计算得到卫星入瞳处的表观辐亮度。最后,提取卫星图像对应像元的计数值并进行平均,将表观辐亮度与图像平均计数值比较得到卫星各波段的辐射亮度定标系数^[1,8]。

$$A_i = L_i / (C_{DN_i} - C_{DN_{i0}}), \tag{1}$$

式中 i 为 ATR 的波段号, L_i 为表观辐亮度, C_{DN_i} 为遥感器计数值, $C_{DN_{i0}}$ 为遥感器计数值的偏移量。

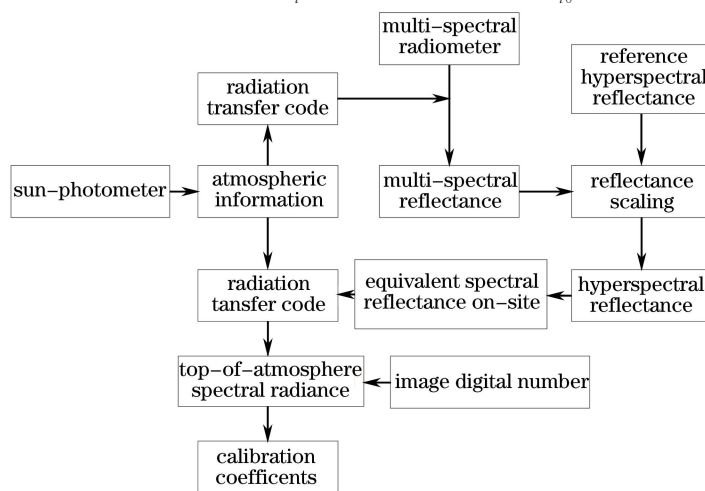


图 1 场地自动化观测定标方法流程图

Fig. 1 Flow chart of in-site automated observation calibration method

2.2 场地自动化观测定标试验

为验证场地自动化观测定标的准确性,安光所参加了 2015 年的敦煌辐射校正场卫星定标试验。根据反射率基法^[3-5],卫星定标需要的最基本参数是地表反射率和大气参数。试验中所用的自动化观测设备如图 2 所示。

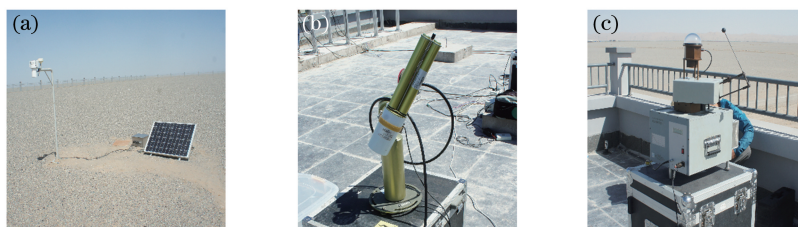


图 2 自动化观测设备。(a) ATR; (b) CE318; (c) 漫总比辐射仪

Fig. 2 Automated observation devices. (a) ATR; (b) CE318; (c) diffuser-to-globe irradiance meter

试验期间,利用安光所新研制的通道式 ATR[图 2(a)]来测量地表辐亮度,包括温、湿度信息;利用 CE318 型太阳光度计[图 2(b)]和漫总比辐照度仪[图 2(c)]来分别测量气溶胶光学厚度和漫总比;同时在测量站内进行小范围跑场,以获取场地平均反射率数据。Aqua 和 Terra 的过顶时刻以及太阳天顶角和方位角、卫星天顶角和方位角参数见表 1。

表 1 MODIS 过顶时刻及卫星、太阳的天顶角与方位角

Table 1 Overpass time of MODIS, zenith and azimuth angles of satellite and sun

Satellite	Date	Time (Beijing)	MODIS		Sun	
			Zenith /($^{\circ}$)	Azimuth /($^{\circ}$)	Zenith /($^{\circ}$)	Azimuth /($^{\circ}$)
Aqua	08-14	14:30	34.42	76.00	27.33	203.05
Aqua	08-19	14:48	3.96	79.34	30.51	211.04
Aqua	08-21	14:36	25.35	77.03	30.05	205.30
Terra	08-14	12:50	18.03	282.42	28.46	150.37
Terra	08-21	12:57	27.88	283.39	29.87	155.61

2.3 自动化观测设备

场地自动化观测定标方法要求定标仪器能够长期布置在场地,实现无人值守、自动化测量、远程数据传输等。

2.3.1 自动化场地辐射计

安光所研制的 ATR 在试验期间经历了风沙、阴雨、高温等恶劣天气的考验并获得了比较理想的数据。ATR 覆盖可见光至短波红外的 8 个波段,采用滤光片分光、Si 和 InGaAs 光电二极管探测,技术参数见表 2。ATR 放置在高 1.8 m 的支架上,视场覆盖正下方直径 30 cm 的圆形区域,每间隔 3 min 采集一次数据。ATR 光学头部采用半导体热电致冷器进行整体温控,以保证测量数据的长期稳定性;采用太阳能供电,全天候测量;利用北斗通信卫星实现实时数据的远程无线传输;添加增强型防雨设计,保证仪器长期稳定工作。

表 2 ATR 技术参数^[10-11]

Table 2 Technical specifications of ATR

Parameter item	Value
Center wavelength /nm	405, 450, 525, 610, 700, 808, 980, 1540
Bandwidth /nm	20-40
Control temperature / $^{\circ}$ C	25 \pm 5
Angle of field of view /($^{\circ}$)	10

2.3.2 太阳辐射计

CE318 型太阳光度计是法国 CIMEL 公司生产的自动跟踪扫描太阳辐射计,可进行太阳直接辐射测量,采用窄带滤光片分光、Si 探测器探测,可自动观测并对观测数据进行温度补偿,其波段设置见表 3。

表 3 CE318 波段配置

Table 3 Band allocation of CE318

Band	Center wavelength /nm	Bandwidth /nm
1	412	10
2	440	10
3	500	10
4	531	10
5	550	10
6	670	10
7	870	10
8	936	10
9	1020	10

2.3.3 漫总比辐照度仪

漫总比辐照度仪体积小、重量轻,光谱范围为 400~2400 nm,在可见光、近红外和短波红外的光谱分辨率分别为 4,7.5,18.5 nm,用于测量漫总比,能够自动跟踪太阳、调节增益、存储数据,适合野外无人值守自动工作。

3 数据处理

3.1 气溶胶光学厚度计算

太阳直接辐照度的测量数据可以用来反演气溶胶光学厚度^[12-15]。图 3 所示为 2015 年 8 月 14,19,21 日在波长为 412,440,500,531,550,670,870,1020 nm 处的气溶胶光学厚度,可以看出气溶胶日变化曲线缓慢平稳,说明大气稳定干洁。

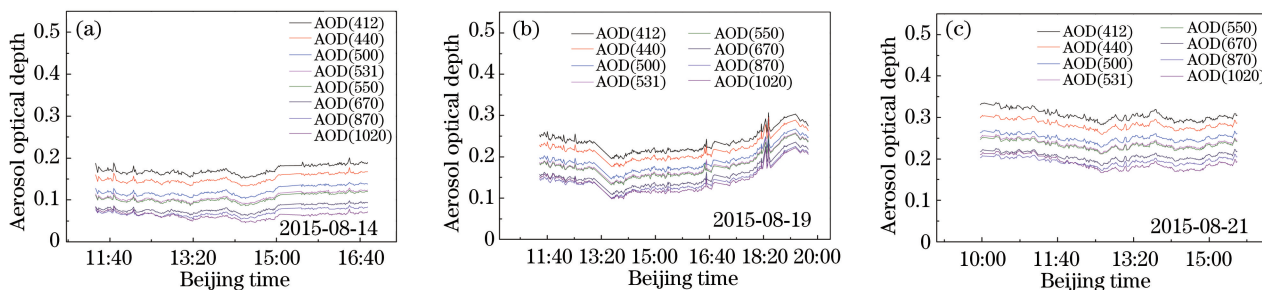


图 3 各个波长处的气溶胶光学厚度。(a) 8 月 14 日; (b) 8 月 19 日; (c) 8 月 21 日

Fig. 3 Aerosol optical depth at various wavelengths on (a) August 14; (b) August 19; (c) August 21

3.2 天空漫射照度计算

试验期间,漫总比辐照度仪全天自动观测,天空漫射辐照度为

$$E_{\text{sky}} = \frac{\alpha \cdot E_{\text{solar}} \cdot \cos \theta}{1 - \alpha}, \quad (2)$$

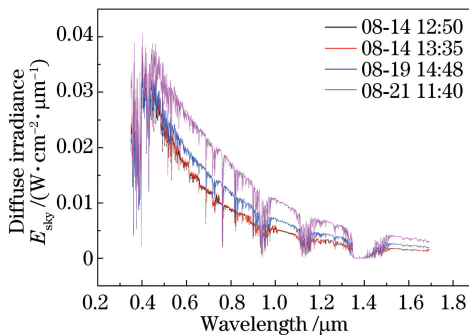


图 4 卫星过顶前后的漫射辐照度

Fig. 4 Diffuse irradiance near the time of overpass

式中 α 为漫总比, E_{solar} 为太阳直接辐照度, θ 为太阳天顶角。图 4 所示为 2015 年 8 月 14, 19, 21 日卫星过顶前后获取的天空漫射照度。

3.3 地表反射率的计算

3.3.1 多光谱地表反射率的计算

利用 ATR 观测的地表辐亮度数据并结合大气参数, 可计算得到多光谱地表反射率, 计算公式为^[4-6]

$$\rho_i = \frac{\pi C_i V_i}{(E_{\text{solar}} \cdot \cos \theta + E_{\text{sky}})_i}, \quad (3)$$

式中 ρ_i 为波段 i 的地表反射率, C_i 为波段 i 的定标系数, V_i 是波段 i 的输出电压, $(E_{\text{solar}} \cdot \cos \theta + E_{\text{sky}})_i$ 为波段 i 的等效总照度, 其中 E_{solar} 采用辐射传输模型 (MODTRAN4) 计算得到。图 5 所示为计算得到的各波段地表反射率。

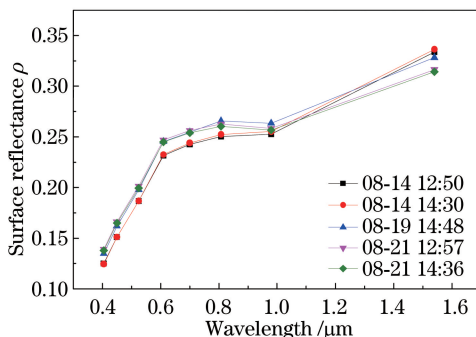


图 5 卫星过顶时刻的多光谱地表反射率

Fig. 5 Multi-spectral surface reflectance at overpass time

3.3.2 高光谱地表反射率的计算

根据敦煌辐射校正场地特性相对稳定的特点^[9], 高光谱地表反射率可以基于多光谱反射率对参考高光谱地表反射率曲线通过幅度调整得到。为了选择可以代表整个场地特性的反射率曲线, 采用了 2015 年 8 月 19 日跑场测量的场地平均地表反射率曲线作为参考, 如图 6 红色曲线所示, 根据高光谱与多光谱反射率的关系, 调整幅度 k 可由下式得到^[5]:

$$W = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=8} \frac{1}{\sigma_i} (\rho_i - k - \rho_{\text{ref}i})^2}, \quad (4)$$

式中 i 是 ATR 的波段号, ρ_i 是波段 i 的地表反射率, $\rho_{\text{ref}i}$ 是波段 i 的等效参考反射率, σ_i 是利用软件模式计算得到的地表反射率的标准偏差, k 是高光谱地表反射率参考曲线需要平移的幅值, W 极小值处的 k 即为最佳偏移量。图 6 中蓝色曲线为利用 2015 年 8 月 14 日测量的多光谱反射率 (黑色三角形) 计算得到的高光谱地表反射率曲线。其中, 8 月 19 日跑场采用的地物光谱仪 (HR1024i, SVC, 美国) 光谱范围为 350~2500 nm, 在波段 350~1000 nm、1000~1850 nm、1850~2500 nm 的光谱分辨率分别为 3.5, 8.5, 6.5 nm。

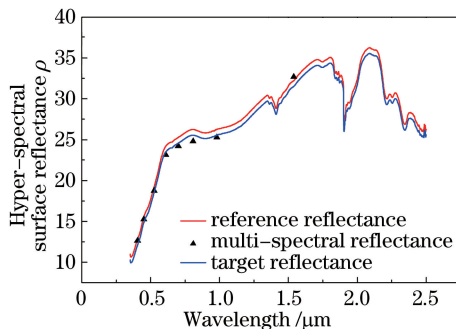


图 6 利用地表多光谱反射率反演高光谱反射率

Fig. 6 Hyper-spectral surface reflectance inverted by surface multi-spectral reflectance

3.3.3 MODIS 波段反射率计算

采用 Ross-Li 模型^[16-18] 对高光谱地表反射率曲线进行二向性修正,利用修正后的高光谱反射率数据与 MODIS 波段相对响应函数进行卷积,获得 MODIS 对应波段的等效地表反射率:

$$\rho_i = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) f_{RSR_i}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_{RSR_i}(\lambda) d\lambda}, \quad (5)$$

式中 ρ_i 为 MODIS 波段 i 的等效地表反射率, f_{RSR_i} 为 MODIS 波段 i 的相对光谱响应函数, $\rho(\lambda)$ 为高光谱地表反射率。5 个定标时刻的 MODIS/Aqua 和 MODIS/Terra 波段 1~7 的等效地表反射率见表 4。

表 4 MODIS/Aqua 和 MODIS/Terra 的等效地表反射率

Table 4 Equivalent surface reflectance of MODIS/Aqua and MODIS/Terra

MODIS band	Equivalent surface reflectance of MODIS				
	MODIS /Aqua			MODIS /Terra	
	08-14 14:30	08-19 14:48	08-21 14:36	08-14 12:50	08-21 12:57
1	0.2178	0.2444	0.2332	0.2259	0.2319
2	0.2312	0.2575	0.2466	0.2392	0.2453
3	0.1413	0.1611	0.1551	0.1463	0.1542
4	0.1855	0.2096	0.2003	0.1925	0.1991
5	0.2600	0.2860	0.2753	0.2677	0.2741
6	0.3098	0.3364	0.3252	0.3176	0.3240
7	0.3331	0.3578	0.3478	0.3397	0.3467

4 MODIS 定标结果对比与分析

基于反射率基法,将卫星过顶时刻的 MODIS 等效地表反射率、550 nm 处的气溶胶光学厚度 f_{AOD550} 、水汽和臭氧(O₃)含量、卫星和太阳的天顶角与方位角等参数输入到 6S 模型,可获得 MODIS 各波段的表观辐亮度。其中,大气柱水气含量是利用探空观测廓线计算获得的^[19-21],臭氧含量是在美国国家航空航天局臭氧与空气质量监测系统网站上获取的。卫星过顶时刻的大气参数见表 5,其中 DU 是用来度量大气中臭氧柱尺度的单位,它等于在标准大气状态下千分之一厘米臭氧层的厚度。

表 5 卫星过顶时刻的大气参数

Table 5 Atmospheric parameters at the time of overpass

Satellite	Date	Beijing Time	Content of water vapor / (g·cm ⁻²)	f_{AOD550}	Content of O ₃ /DU
Aqua	08-14	14:30	0.7337	0.0903	280
Aqua	08-19	14:48	0.9186	0.1701	308
Aqua	08-21	14:36	0.9768	0.2269	297
Terra	08-14	12:50	0.7337	0.0974	280
Terra	08-21	12:57	0.9768	0.2297	297

提取测区的 2 pixel×2 pixel 像元并取平均值,结合星上定标系数可获得 MODIS 观测到的表观辐亮度。MODIS/Aqua 和 MODIS/Terra 观测到的表观(TOA)辐亮度、自动化观测定标法获取的等效表观辐亮度及二者之间的相对偏差分别见表 6 和表 7。从 MODIS/Aqua 的定标结果可以看出,各波段相对偏差均小于 3%(8 月 14 日波段 7 除外);由 MODIS/Terra 的定标结果可以看出,两次定标各波段的相对偏差均小于 3.8%,这表明场地自动化观测定标得到的表观辐亮度与星上测量的一致性很好。

MODIS/Aqua 和 MODIS/Terra 定标结果与星上结果的相对偏差的平均值与标准偏差见表 8,可以看出,MODIS/Aqua 三次定标结果中各波段的相对偏差的标准偏差均小于 1.5%,MODIS/Terra 两次定标结果的标准偏差均小于 1.7%,这说明场地自动化观测定标具有较好的重复性,定标结果较稳定。

表 6 利用 AORC 与 MODIS/Aqua 测量的表观辐亮度之间的相对偏差

Table 6 Relative difference in TOA spectral radiance obtained from AORC and MODIS/Aqua

MODIS band	08-14 14:30			08-19 14:48			08-21 14:36		
	TOA spectral radiance		Relative difference /%	TOA spectral radiance		Relative difference /%	TOA spectral radiance		Relative difference /%
	$/W \cdot (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)^{-1}$			$/W \cdot (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)^{-1}$			$/W \cdot (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)^{-1}$		
	MODIS /Aqua	AORC	MODIS /Aqua	AORC	MODIS /Aqua	AORC			
1	92.680	92.539	-0.152	98.330	97.961	-0.375	95.424	93.840	-1.660
2	61.722	62.279	0.903	65.107	65.545	0.673	63.353	63.186	-0.263
3	102.685	100.857	-1.779	108.577	106.503	-1.910	105.895	103.595	-2.171
4	97.195	95.521	-1.721	103.013	101.322	-1.640	100.237	97.389	-2.841
5	32.287	33.255	2.998	33.812	34.632	2.425	32.690	33.625	2.859
6	19.509	19.668	0.818	20.724	20.295	-2.071	19.943	19.783	-0.801
7	7.263	7.520	3.529	7.582	7.669	1.136	7.352	7.512	2.173

表 7 利用 AORC 与 MODIS/Terra 测量的表观辐亮度之间的相对偏差

Table 7 Relative difference in TOA spectral radiance obtained from AORC and MODIS/Terra

MODIS band	08-14 12:50			08-21 12:57		
	TOA spectral radiance		Relative difference /%	TOA spectral radiance		Relative difference /%
	$/W \cdot (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)^{-1}$			$/W \cdot (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)^{-1}$		
MODIS /Terra	AORC	MODIS /Terra	AORC			
1	92.492	95.136	2.859	93.862	94.250	0.413
2	62.240	63.522	2.058	63.065	63.352	0.455
3	105.077	101.907	-3.017	108.297	104.183	-3.798
4	98.691	97.867	-0.834	100.194	97.681	-2.508
5	32.796	33.801	3.066	32.726	33.767	3.178
6	19.942	19.956	0.067	19.826	19.895	0.347
7	7.404	7.584	2.429	7.325	7.551	3.079

表 8 利用 AORC 与 MODIS 测量的表观辐亮度相对偏差的平均值与标准偏差

Table 8 Average and standard deviation of relative difference in TOA spectral radiance obtained from AORC and MODIS

MODIS band	Deviation in TOA spectral radiance obtained from AORC and Aqua /%		Deviation in TOA spectral radiance obtained from AORC and Terra /%	
	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
1	-0.729	±0.814	1.636	±1.729
2	0.437	±0.617	1.256	±1.133
3	-1.953	±0.199	-3.408	±0.552
4	-2.068	±0.671	-1.671	±1.183
5	2.761	±0.298	3.122	±0.079
6	-0.684	±1.448	0.207	±0.197
7	2.279	±1.200	2.754	±0.460

5 结 论

采用基于场地自动化观测的在轨辐射定标方法获取了 MODIS 的表观辐亮度并与星上观测值进行了比较,二者获取的表观辐亮度相对偏差在 4% 以内,这表明场地自动化观测定标与传统人工定标方法的定标精度在同一水平^[8],验证了场地自动化观测定标方法的可行性。场地自动化观测定标方法基于反射率基法,其关键在于利用 ATR 测量的地表辐亮度计算得到多光谱地表反射率,进而扩展为可见近红外波段的高光谱地表反射率,其最大的优势在于不需要人工参与,只要天气条件允许就可以对过顶卫星进行定标。该方法能提高传感器的定标频次,及时更新定标系数,尤其是对于没有星上定标系统的遥感卫星,可以更好地监测传感器响应的变化规律,保证遥感数据的质量。场地自动化观测定标方法能够在保证定标精度的条件下有效增加定标频次和降低定标成本。

致谢 感谢中国气象局国家卫星气象中心在大气参数和双向反射分布函数修正方面给予的帮助和支持。

参 考 文 献

- 1 Gong Hui, Tian Guoliang, Yu Tao, *et al.*. Calibration and validation of MODIS visible and near-infrared bands[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010, 34(1): 109-113.
巩 慧, 田国良, 余 涛, 等. MODIS 可见近红外波段定标与真实性检验[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(1): 109-113.
- 2 Guo Jianning, Min Xiangjun, Fu Qiaoyan, *et al.*. The in-flight absolute calibration for CBERS-02 CCD and SPOT-4 HRV IR1 sensors at Dunhuang test site and the comparison based on their coefficients[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(5): 624-629.
郭建宁, 闵祥军, 傅俏燕, 等. CBERS-02 CCD 和 SPOT-4 HRV IR1 两个传感器的敦煌场地在轨绝对辐射定标及对比分析[J]. 遥感学报, 2006, 10(5): 624-629.
- 3 Biggar S F. In-flight methods for satellite sensor absolute radiometric calibration[D]. Tucson: The University of Arizona, 1990: 16-22.
- 4 Czaplá-Myers J S, Thome K J, Lleso N P. Radiometric calibration of earth-observing sensors using an automated test site at Railroad Valley, Nevada[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2010, 36(5): 474-487.
- 5 Czaplá-Myers J S. Automated ground-based methodology in support of vicarious calibration[D]. Tucson: The University of Arizona, 2006: 41-43, 54-57.
- 6 Li Xin, Zheng Xiaobing, Yin Yapeng. 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.
- 7 Schmechtig C, Santer R P, Roger J-C, *et al.*. Automatic ground-based station for vicarious calibration[C]. SPIE, 1997, 3221: 309-317.
- 8 Kerola D X, Bruegge C J, Gross H N, *et al.*. On-orbit calibration of the EO-1 Hyperion and advanced land imager (ALI) sensors using the LED spectrometer (LSpec) automated facility [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(4): 1244-1255.
- 9 Gu Xingfa, Tian Guoliang, Yu Tao, *et al.*. Principles and methods of radiometric calibration for space optical remote sensor [M]. Beijing: Science Press, 2013: 78-79.
顾行发, 田国良, 余 涛, 等. 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: 78-79.
- 10 Yin Yapeng, Li Xin, Zheng Xiaobing, *et al.*. Design and implement of automated site observing radiometer[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2016, 11(1): 44-50.
尹亚鹏, 李 新, 郑小兵, 等. 场地自动化观测辐射计的设计与实现[J]. 大气与环境光学学报, 2016, 11(1): 44-50.
- 11 Li Xin, Yin Yapeng, Liu Enchao, *et al.*. Automated test-site radiometer for vicarious calibration[C]. SPIE, 2014, 9264: 92640V.
- 12 Bi Xueyan, Wu Dui, Tan Haobo, *et al.*. Application, calculation and calibration of Microtops II sunphotometer[J]. Meteorological Science and Technology, 2007, 35(4): 338-587.
毕雪岩, 吴 兑, 谭浩波, 等. Microtops II 型太阳光度计的使用计算及定标[J]. 气象科技, 2007, 35(4): 338-587.
- 13 Yang Lei, Zhang Xuewen, Han Qijin. Retrieval and analysis of aerosol optical thickness over Dunhuang region[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2014, 9(1): 37-42.
杨 磊, 张学文, 韩启金. 敦煌地区气溶胶光学厚度的反演研究[J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(1): 37-42.
- 14 Xu Qiuyun, Zheng Xiaobing, Zhang Wei, *et al.*. Advanced calibration method for sun radiometers[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1337-1342.
徐秋云, 郑小兵, 张 伟, 等. 太阳辐射计先进定标方法研究[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1337-1342.
- 15 Tan Kun, Wan Jie, Tu Ruifang, *et al.*. Multi-purpose solar photometer[J]. Acta Optica Sinica, 1991, 11(5): 448-452.
谭 锬, 王 洁, 屠瑞芳, 等. 多功能太阳辐射计[J]. 光学学报, 1991, 11(5): 448-452.
- 16 Li Yuan, Zhang Yong, Liu Jingjing, *et al.*. Calibration of visible and near-infrared channels of the FY-2C/FY-2D GEO meteorological satellite at radiometric site[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 41-46.
李 元, 张 勇, 刘京晶, 等. 风云二号静止气象卫星可见光通道辐射校正场定标方法研究[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 41-46.
- 17 Li Yuan, Rong Zhiguo, Zheng Zhaojun, *et al.*. Post launch site calibration of visible and near-infrared channels of FY-3A visible and infrared radiometers[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(12): 2966-2974.

- 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.
- 18 Li Y, Rong Z G, Zhang L J, *et al.*. The comparison of BRDF model and validation of MCD43 products by the 2013 Dunhung Gobi experiments[C]. SPIE, 2014, 9264: 926415.
- 19 Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, *et al.*. Atmospheric physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003: 18-23.
盛裴轩. 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 18-23.
- 20 Wang Bingzhong, Liu Gengshan. An estimation of total atmospheric water vapor in the mainland of China[J]. Acta Geographica Sinica, 1993, 48(3): 244-253.
王炳忠, 刘庚山. 我国大陆大气水汽含量的计算[J]. 地理学报, 1993, 48(3): 244-253.
- 21 Wang Hong, Cao Yunchang, Guo Qiyun, *et al.*. Calculation of vapor pressure using sounding data[J]. Meteorological Science and Technology, 2013, 41(5): 847-851.
王 洪, 曹云昌, 郭启云, 等. 利用探空资料计算水汽压[J]. 气象科技, 2013, 41(5): 847-851.