

# 基于敦煌辐射校正场的自动化辐射定标方法

吕佳彦<sup>1</sup>, 何明元<sup>1</sup>, 陈 林<sup>2,3\*</sup>, 胡秀清<sup>2,3</sup>, 李 新<sup>4</sup>

<sup>1</sup>解放军理工大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101;

<sup>2</sup>中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081;

<sup>3</sup>中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081;

<sup>4</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

**摘要** 提出了基于自动化多通道光谱辐射计(ATR)、6SV 辐射传输模型、敦煌场地历史高光谱反射率模型、中分辨率成像光谱仪(MODIS)的双向反射分布函数(BRDF)的自动化辐射定标方法。当天气状况和卫星观测几何参数满足条件时,所提方法可对遥感器进行连续辐射定标。2015 年 8 月至 2016 年 3 月在敦煌辐射校正场进行了实验,共获取 17 天的有效观测数据。以“水”卫星的中分辨率成像光谱仪(AQUA/MODIS)为辐射基准,验证了所提方法的精度和定标频次。结果表明平均 10~15 天能够对卫星遥感器进行一次辐射定标。与 AQUA/MODIS 各通道观测数据相比,利用所提方法得到的大气顶反射率的相对偏差均小于 5%,平均相对偏差小于 2%,标准差小于 2%。

**关键词** 大气光学; 遥感; 自动化辐射定标; 反射率基法; 相对偏差

**中图分类号** TP722.4; V474.2      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0801003

## Automated Radiation Calibration Method Based on Dunhuang Radiometric Calibration Site

Lü Jiayan<sup>1</sup>, He Mingyuan<sup>1</sup>, Chen Lin<sup>2,3</sup>, Hu Xiuqing<sup>2,3</sup>, Li Xin<sup>4</sup>

<sup>1</sup>College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 211101, China;

<sup>2</sup>National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellite, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

<sup>4</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** An automated radiation calibration method is proposed based on the automated multichannel spectral radiometer (ATR), 6SV radiometric transfer model, historical hyperspectral reflectance model of Dunhuang site and moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) bidirectional reflectance distribution function (BRDF). The proposed method can be used for radiation calibration continuously when the weather and satellite observation geometry parameters satisfy the conditions. Experiments are carried out at Dunhuang radiometric calibration site from August 2015 to March 2016, and effective observation data in 17 days is obtained. AQUA/MODIS is used as radiation benchmark to verify the accuracy and calibration frequency. Results show that the radiometric calibration for a satellite remote sensor can be conducted per average 10-15 days. The reflectivity at top of the atmosphere obtained by the proposed method is compared with the observed data by each channel of AQUA/MODIS, and we find that the relative deviation is less than 5%, the mean relative deviation is less than 2%, and the standard deviation is less than 2%.

**Key words** atmospheric optics; remote sensing; automated radiation calibration; reflectance-based method; relative

**收稿日期:** 2017-03-08; **收到修改稿日期:** 2017-04-06

**基金项目:** 国家自然科学基金(41675036,41475031,41471304,41590874)、国家 863 计划(2015AA123704)

**作者简介:** 吕佳彦(1992—),男,硕士研究生,主要从事气象卫星在轨辐射定标方面的研究。

E-mail: lvjiayan1992@sina.com

**导师简介:** 何明元(1973—),男,博士,副教授,主要从事卫星资料反演与应用方面的研究。E-mail: hmy008@sina.com

\* **通信联系人.** E-mail: chenlin@cma.gov.cn

deviation

OCIS codes 010.0280; 120.0280; 030.5620

## 1 引 言

卫星在长期在轨运行过程中受遥感器元器件老化等因素的影响,通常具有辐射响应衰变特征。因此,为了满足定量化需求,需要对遥感器持续进行辐射校正,以确保观测数据质量<sup>[1]</sup>。对于没有星上定标装置的卫星遥感器,目前主要采用基于辐射校正场的反射率基法来获取定标系数<sup>[2-5]</sup>,该方法经过 30 多年的发展,已较为成熟,常作为获取国产卫星遥感器反射太阳波段辐射定标系数的主要手段<sup>[6-9]</sup>。反射率基法要求在卫星过境时测量辐射校正场地面反射率及气象参数,且在天空晴朗无云的条件下才可以获取有效数据并进行定标<sup>[10]</sup>。我国光学载荷遥感卫星辐射校正场位于甘肃省敦煌市,地处偏远,完成一次实验不仅耗时耗力,还会受到天气的严重制约。对于辐射响应衰变较快的通道,目前基于一年一次敦煌辐射校正场同步观测实验的反射率基法辐射定标已不能及时校正类似通道的快速衰变,难以满足定量化需求<sup>[11-12]</sup>。

为获取更多的地面观测数据,美国亚利桑那大学光学科学中心遥感组于 2004 年开始自动化辐射定标的研究,实现了高频次的辐射定标,校正了遥感器辐射响应衰变,提高了数据质量,从而满足定量化需求;该研究小组基于 2008 年的实验数据计算了大气顶辐亮度,其计算结果与美国陆地卫星 7 号的增强型专题绘图仪(Landsat-7 ETM+)观测值的平均偏差分别为 4.1%和 3.6%,但仅完成了短时间内的定标工作,并未实现对遥感器的长时间序列连续性辐射定标<sup>[13]</sup>。中国气象局国家卫星气象中心联合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,于 2013 年开始在敦煌辐射校正场进行自动化辐射定标实验,于 2014 年和 2015 年夏季在敦煌辐射校正场同步观测实验中进行了自动化多通道光谱辐射计(ATR)、全自动太阳光度计和漫总比辐照度仪等仪器的观测实验,并于 2015 年 8 月至 2016 年 3 月采用 ATR 连续观测,获取了大量实验数据。邱刚刚等<sup>[14]</sup>在 2016 年利用 ATR、CE318 和漫总比辐照度仪 3 种观测仪器,基于 2015 年 8 月 3 天有效观测数据,正演计算得到的表观辐亮度与“水”卫星的中分辨率成像光谱仪(AQUA/MODIS)和 TERRA/MODIS 通道 1~7 的观测值的平均相对偏差分别小于 2.8%和 3.5%,初步验证了自动化辐射定标的可行性,但尚未对较长时间序列的稳定性和精度进行验证。

本文基于 2015 年 8 月—2016 年 3 月的 ATR 观测数据,结合 6SV 辐射传输模型计算的地面下行辐射和光谱辐射计(ASD)测量的敦煌场地先验高光谱地面反射率,拟合得到卫星过境时的高光谱地面反射率。采用 MODIS 产品对反射率进行双向反射分布函数(BRDF)校正,并采用反射率基法计算表观反射率。通过与 AQUA/MODIS 通道 1~7 的观测值进行比较,验证该方法长时间序列的稳定性和精度。

## 2 定标方法

传统的反射率基法辐射定标在卫星过境时采用 ASD 光谱仪人工跑场的方式进行场地地面反射率的测量,获取卫星过境时的高光谱地面反射率<sup>[15-16]</sup>。自动化辐射定标方法与反射率基法的区别主要在于地面数据的观测获取和处理,其技术流程如图 1 所示,其中 AOD 为气溶胶光学厚度,OMI 为臭氧监测仪器,NCEP 为美国气象环境预报中心,FNL 为再分析数据。

### 2.1 仪器介绍

中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的 ATR 已经过前期高温、降水、沙尘等复杂的环境实验,可以稳定可靠地获取有效观测数据。该仪器包含可见光至近红外共 8 个通道,中心波长分别为 405,450,525,610,700,808,980,1540 nm,将 ATR 置于 1.8 m 高的支架上,观测区域为正下方直径为 30 cm 的圆形区域,采样间隔为 3 min。采用半导体热电致冷器对 ATR 光学头部进行整体温控,以保证仪器的长期稳定性;利用太阳能供电,以保证全天候的连续测量;基于北斗通信实现实时数据的远程传输,可以满足无人值守、自动化观测和远程数据传输的基本要求<sup>[14]</sup>。

### 2.2 大气参数获取

由于自动化辐射定标方法尚在实验阶段,目前未能对大气参数进行连续测量。对定标精度影响最大的参数是基于地面反射率测量的精确度;大气参数的影响远小于地面反射率,但也不可忽略。图 2 为模拟的 AOD

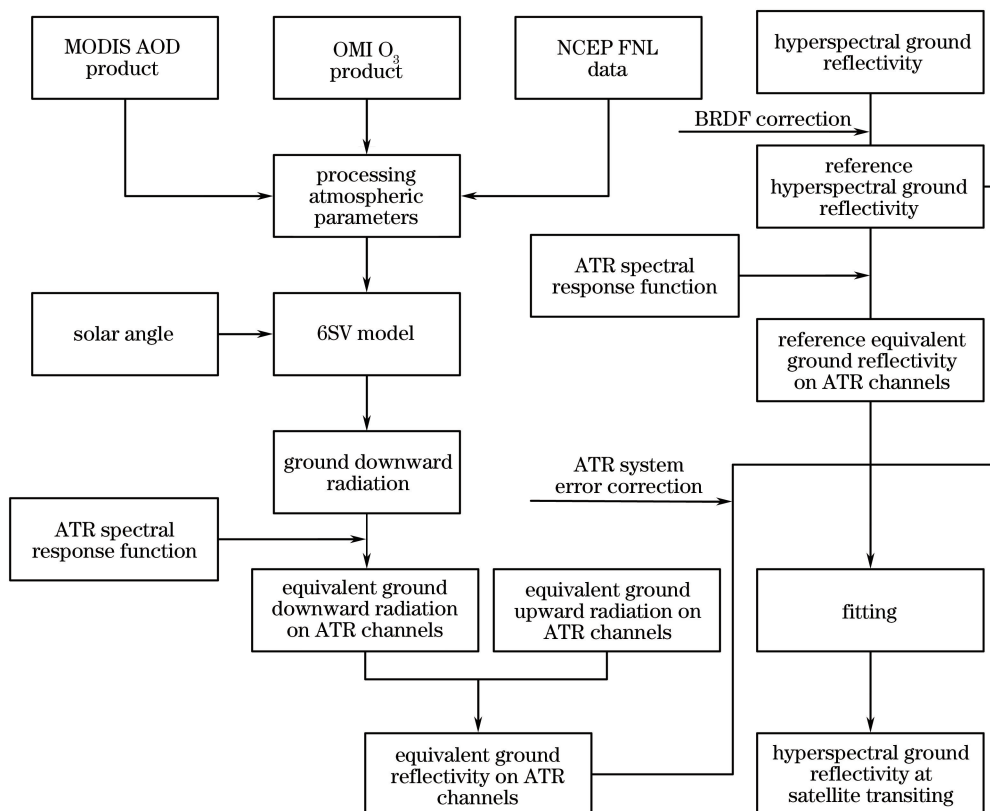


图 1 自动化地面数据处理流程图

Fig. 1 Flowchart of automated ground data processing

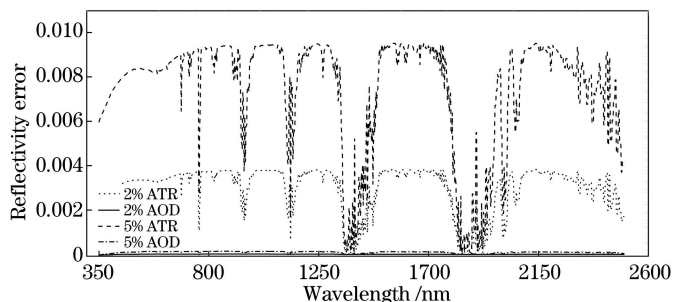


图 2 不同 AOD 和 ATR 观测值误差对大气顶反射率误差的影响

Fig. 2 Influence of different AOD and ATR observed value error on reflectivity error at top of atmosphere

和 ATR 观测值误差对大气顶反射率误差的影响。可以看出 2% 和 5% 的 AOD 观测值误差对大气顶反射率的影响基本可以忽略,而 2% 和 5% 的 ATR 观测值误差对大气顶反射率的影响分别在 0.003 和 0.009 左右。

AOD 采用 AQUA/MODIS 气溶胶产品 (MYD08\_D3) 获得,该产品为日平均全球 AOD,空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ ,可根据经纬度提取观测区的 AOD;臭氧含量采用 AURA/OMI 日平均臭氧产品 (OMTO3e) 测得,空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。臭氧含量比较稳定,对于无有效数据的日期,采用前后两天的平均值来替代;水汽含量由 NCEP 世界时 06 时空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  的 FNL 的等压面数据积分计算得到。

### 2.3 方法介绍

自动化辐射定标方法是采用一台 ATR 连续测量地面上行辐射,通过 6SV 辐射传输模型计算地面下行辐射,从而得到多通道地面反射率。选择卫星过境前后 3 组 ATR 观测值分别计算地面反射率  $R$ ,  $R$  可表示为

$$R = \frac{\pi L}{E_d + E_a + E_e}, \quad (1)$$

式中  $L$  为 ATR 观测的地面上行辐亮度,  $E_d$ 、 $E_a$  和  $E_e$  分别为地面接收到的太阳直接辐射、大气散射辐射和背景环境辐射。

这里仅采用 ATR 作为地面反射率测量的基准,利用大气模式传输模拟大气散射辐射和背景环境辐射。文献[14]中大气散射辐射和背景环境辐射来自另一台测量总辐射和漫射辐射的仪器,要求两台仪器均定标良好且具有一致性。这里仅用一台仪器,可以避免不同仪器间观测不一致而引入的误差,且在评估结果的精度相差不大时可以更好地进行推广应用。

在采用 ATR 观测数据对传感器进行定标之前,首先将同一测区同时刻的由 ATR 观测数据和模型模拟结果相比得到的 ATR 通道等效地面反射率与 ASD 测量数据计算得到的 ATR 通道等效地面反射率进行比较,得到 ATR 的系统误差。5 次的 ASD 和 ATR 同步观测实验结果表明,由 ATR 观测数据计算得到的等效反射率总是小于前 4 个通道由 ASD 测量数据计算得到的等效反射率,并大于后 4 个通道由 ASD 测量数据计算得到的等效反射率,如图 3 所示。可以看出 5 次同步观测实验结果的变化趋势具有很好的一致性,ATR 存在一定的系统误差。因此在拟合之前,需要对由 ATR 观测数据计算得到的反射率进行校正,以消除系统误差。

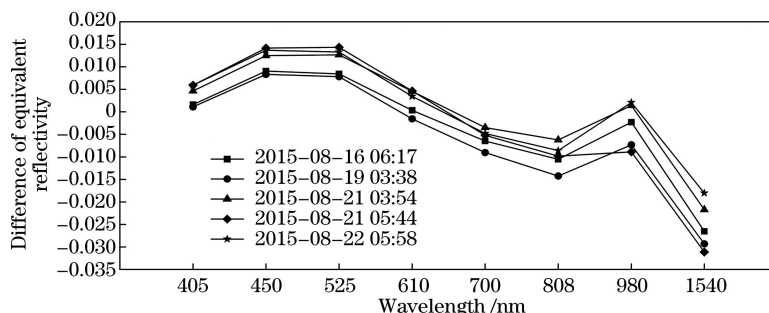


图 3 由 ASD 测量数据与 ATR 观测数据得到的等效反射率差值

Fig. 3 Difference of equivalent reflectivity between ASD measured data and ATR observed data

采用自动化辐射定标方法时,一个最基本的前提条件是敦煌辐射校正场地地面反射率相对稳定。顾行发等<sup>[17]</sup>对 2000—2008 年由 ASD 测量的敦煌场地的地面反射率结果进行了分析,结果表明在 350~1250 nm 的波长范围内,多年测量得到的地表光谱曲线都非常接近,平均相对差异变化为 3.88%,说明敦煌场地地面反射率随时间的变化很小,光谱在时间上具有很好的稳定性。图 4 为 2011—2015 年在敦煌场地多次实地测量地面反射率结果的平均值。由于 ASD 采用 3 段拼接的探测器,在两段探测器拼接区域的响应有较大的波动。1900 nm 附近的 ASD 测量过渡区有强烈扰动,因此将这部分数据剔除。由图 4 可以看出,场地地面反射率光谱形状基本一致,而且各年反射率在可见光波段几乎没有差异,近红外波段差异也很小,进一步说明了敦煌辐射校正场地地面反射率的时间稳定性。

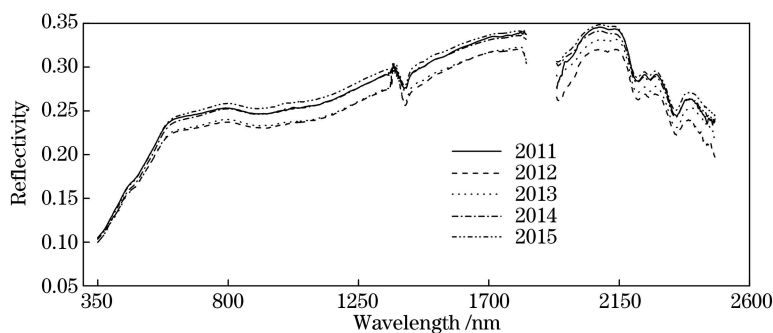


图 4 2011—2015 年采用 ASD 测量的敦煌场地地面反射率

Fig. 4 Ground reflectivity of Dunhuang site measured by ASD from the year of 2011 to 2015

影响地面反射率的主要因素包括太阳几何和大气环境等,故拟合前先对 ASD 测量的高光谱反射率进行 BRDF 校正,以消除太阳几何的影响,从而得到该日的先验高光谱地面反射率。根据多通道地面反射率的平均值与先验高光谱地面反射率进行拟合,结果可表示为

$$W = \sqrt{\sum_{b=1}^{b=8} \frac{1}{\sigma_b} [\bar{R} - (k + R')]^2}, \quad (2)$$

式中  $\bar{R}$  和  $\sigma_b$  分别为计算得到的 3 组地面反射率的平均值和标准偏差,  $R'$  为该日先验高光谱地面反射率在



ATR 通道的等效反射率,  $k$  为该日高光谱地面反射率需要平移的幅值。图 5 为通过多通道反射率拟合得到的 2015 年 10 月 13 日的高光谱地面反射率。

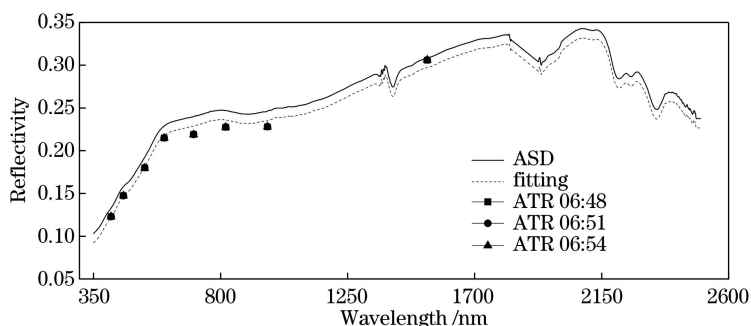


图 5 由多通道反射率拟合得到的高光谱地面反射率

Fig. 5 Hyperspectral ground reflectivity fitted by multi-channel reflectivity

目前只有敦煌辐射校正场 2013 年夏季的实测 BRDF, 这里比较了 2013 年夏季的实测 BRDF 与 MODIS 的 BRDF(MCD43C1)。图 6 为不同 BRDF 的各项均匀散射权重系数参数(ISO)在 MODIS 通道 1~7 的差异。可以看出 2013 年夏季的实测 BRDF 与 MODIS 在 2015 年夏季的 BRDF 产品比较接近。但由 MODIS 的 BRDF 产品可以看出敦煌场地的 BRDF 参数存在季节上的差异, 若各个季节均采用 2013 年夏季实测的 BRDF, 会对定标结果产生一定的影响, 因此这里采用 MODIS 的 BRDF 产品对反射率进行校正, 该产品为空间分辨率为  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  的 MODIS 通道 1~7 8 天的平均产品, 根据经纬度可以提取敦煌地区的 BRDF 参数。

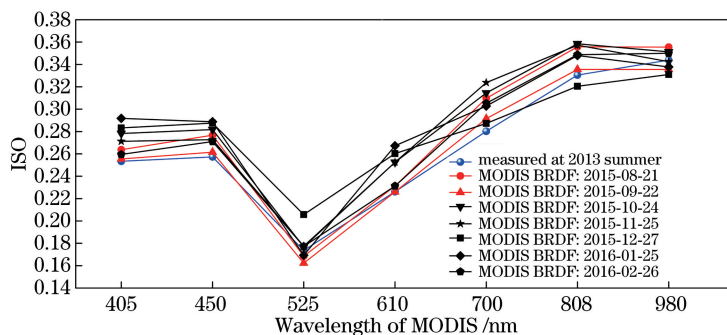


图 6 不同 BRDF 的 ISO 在 MODIS 通道 1~7 的差异

Fig. 6 Difference among ISO of different BRDF in MODIS channel 1-7

由于只有一台 ATR 在固定点对地观测, 故星地配准的规则为: 以距离观测点最近的像元为中心, 选取  $3 \times 3$  像元窗口, 取其均值进行计算。若像元与观测点的距离偏差超过 0.75 km, 则星地配准不成功, 视为无效日; 若  $3 \times 3$  像元窗口变异系数 CV(标准差/平均相对偏差) 超过 1%, 则剔除像元窗口内距平绝对值最大的像元, 直到 CV 满足条件。

### 3 精度验证

MODIS 是搭载在 TERRA 卫星和 AQUA 卫星上的高精度遥感器, 用于对地表、生物圈、固态地球、大气和海洋进行长期的全球观测<sup>[18]</sup>。MODIS 具有完备的星上定标设备, 星上定标结果仅具有 2% 的不确定度。由于 AQUA/MODIS 辐射性能优于 TERRA/MODIS<sup>[19]</sup>, 这里以 AQUA/MODIS 通道 1~7 为辐射基准, 对自动化辐射定标方法的定标精度进行评估。利用上述方法计算 MODIS 通道 1~7 的大气顶表观反射率, 并与 MODIS 实际卫星观测值进行比较, 用以评估自动化辐射定标方法反射太阳波段辐射定标的精度。

从美国国家航空航天局(NASA)获取了实验期间 MODIS 1 级(MYD1KM)和定位(MYD03)产品。采用上述方法进行  $3 \times 3$  像元窗口的剔除, 得到 MODIS 的实际观测值。受天气和卫星几何的影响, 实验期间共有 17 天有效数据可做定标, 卫星过境时的大气参数和观测几何参数如表 1 所示。

表 1 卫星过境时的大气参数与观测几何参数

Table 1 Atmospheric parameters and observation geometry parameters at satellite transit time

Date	AOD	Water vapor density /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	O <sub>3</sub> content /DU	Solar zenith angle /( $^{\circ}$ )	Satellite zenith angle /( $^{\circ}$ )	Relative azimuth angle /( $^{\circ}$ )
2015-08-21	0.122	1.0003	297.4	30.07	25.62	128.47
2015-09-13	0.057	0.5284	298.0	38.14	15.19	127.64
2015-09-20	0.058	0.8644	277.2	41.36	3.97	127.81
2015-09-29	0.057	1.0058	272.1	44.59	15.20	126.21
2015-10-04	0.061	0.5353	298.7	48.72	18.66	309.70
2015-10-08	0.059	0.3661	302.3	48.19	25.34	124.70
2015-10-13	0.059	0.5836	286.7	51.27	7.59	306.46
2015-10-22	0.060	0.6129	288.3	54.10	3.81	119.56
2015-10-27	0.061	0.3299	303.8	57.46	28.86	307.98
2015-10-31	0.060	0.9927	285.2	56.68	14.83	124.73
2015-11-07	0.077	0.5817	317.4	58.79	3.61	121.88
2015-11-12	0.058	0.5128	301.9	61.69	28.86	305.62
2015-11-25	0.054	0.4370	271.2	62.27	25.34	119.46
2015-12-02	0.060	0.2636	285.0	63.78	15.01	118.64
2015-12-09	0.060	0.4296	288.2	64.80	3.79	121.79
2016-01-15	0.067	0.3557	322.1	63.74	28.76	298.27
2016-03-07	0.239	0.3822	302.9	46.56	14.83	118.11

表 2 为正演大气顶反射率( $R_c$ )与 MODIS 观测值( $R_m$ )的相对偏差  $D$ ,  $D = 100(R_c - R_m)/R_m$ 。表中  $\lambda_1 \sim \lambda_7$  分别代表 645, 858, 470, 555, 1240, 1640, 2130 nm。可以看出通道 1~6 的相对偏差均在 5% 以内, 除在 2130 nm 处辐射信号较弱外, 其余各通道的平均相对偏差均小于 2%, 标准差小于 2%。MODIS 通道 7 的正演大气顶反射率与卫星观测的结果相比总体偏大, 出现该现象的原因可能为: 1) MODIS 通道 7 位于短波红外通道, 太阳辐射信号较弱; 2) ATR 通道的最长波长只有 1540 nm, 且存在一定的系统误差。

表 2  $R_c$  与  $R_m$  的相对偏差  $D$  以及平均相对偏差和标准差

Table 2 Relative deviation  $D$ , mean relative deviation and standard deviation between  $R_c$  and  $R_m$  %

Date	$D$						
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$
2015-08-21	-0.44	-1.15	1.57	-0.41	-0.25	-3.59	0.09
2015-09-13	0.87	0.99	0.80	-0.84	-0.05	-2.13	1.87
2015-09-20	0.86	1.18	-0.08	-1.07	-0.31	0.19	2.86
2015-09-29	1.31	2.64	0.75	-1.21	2.22	-0.07	3.50
2015-10-04	0.50	1.27	-1.69	-2.25	-0.82	0.64	2.72
2015-10-08	2.70	2.80	2.85	0.63	3.04	-3.42	2.00
2015-10-13	-0.42	-0.08	-0.27	0.29	-0.36	-2.58	2.43
2015-10-22	-2.50	-0.98	-1.74	-4.12	1.35	0.48	3.04
2015-10-27	0.59	1.77	2.51	-1.57	2.92	-2.93	3.57
2015-10-31	-1.20	0.38	3.40	-3.68	4.11	0.74	3.81
2015-11-07	-2.34	-0.13	-0.96	-4.67	3.18	0.21	4.66
2015-11-12	1.43	3.30	2.69	-0.78	3.09	1.70	5.10
2015-11-25	2.50	4.38	0.38	-2.41	2.08	0.66	6.24
2015-12-02	1.97	2.91	2.43	-0.99	2.67	2.40	0.13
2015-12-09	1.37	3.34	-1.18	-1.35	3.41	0.44	1.96
2016-01-15	2.59	3.86	-0.12	-2.04	3.85	2.64	5.68
2016-03-07	-0.28	-1.05	3.24	1.61	1.91	1.03	3.23
Mean relative deviation	0.56	1.50	0.86	-1.46	1.88	-0.21	3.11
Standard deviation	1.58	1.80	1.75	1.65	1.64	1.97	1.70

将 2015 年 8 月 21 日的正演大气顶反射率与 MODIS 观测值相对偏差的自动化辐射定标方法结果和反射率基法结果进行比较, 结果如表 3 所示, 进一步验证该方法的精度。由表 3 可以看出自动化辐射定标方法

与反射率基法的精度很接近,说明自动化辐射定标方法在不降低精度的前提下,可以发挥其省时省力和高频次定标的优势。

表 3 自动化辐射定标方法和反射率基法所得结果的相对偏差

Table 3 Relative deviation of results obtained by automated radiation calibration method and reflectance-based method %

Method	Relative deviation						
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$
Automated radiation calibration method	-0.44	-1.15	1.57	-0.41	-0.25	-3.59	0.09
Reflectance-based method	-1.00	-1.98	0.49	-0.39	0.94	-0.81	5.29

## 4 结 论

提出了基于 ATR、6SV 辐射传输模型、敦煌场地历史高光谱反射率模型、MODIS BRDF 产品的自动化辐射定标方法,以 AQUA/MODIS 为辐射基准验证了该方法的精度和定标频次。通过 2015 年 8 月—2016 年 3 月的 ATR 自动化观测实验,获取了 17 天的有效数据,平均 10~15 天能够对卫星遥感进行辐射定标。自动化辐射定标方法计算的正演大气顶反射率与 MODIS 观测值的相对偏差结果表明 MODIS 通道 1~6 的相对偏差均在 5% 以内,各通道平均相对偏差小于 2%,标准差小于 2%。将 2015 年 8 月 21 日自动化辐射定标方法的结果与人工测量的场地反射率基法的结果相比较,发现两者的精度非常接近。所提方法具有良好的长时间序列稳定性和较高的精度,在天气状况和卫星几何参数满足条件时可以开展辐射定标工作,充分发挥其连续观测的优势,对遥感的辐射性能进行长期连续监测和及时校正,提高辐射定标频次,从而更好地满足量化的需求。此外,所提方法仅采用一台地表观测仪器 ATR,因此更具有实际应用的价值。

## 参 考 文 献

- [1] Xu Weiwei, Zhang Liming, Yang Benyong, *et al.* On-orbit radiometric calibration based on gray-scale tarps[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0212007.  
徐伟伟, 张黎明, 杨本永, 等. 基于多灰阶靶标的在轨辐射定标方法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0212007.
- [2] Slater P N, Biggar 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.
- [3] Thome K J, Crowther B G, Biggar S F. Reflectance- and irradiance-based calibration of Landsat-5 thematic mapper[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1997, 23(4): 309-317.
- [4] Lee S G, Jin C G, Choi C U, *et al.* Absolute radiometric calibration of the KOMPSAT-2 multispectral camera using a reflectance-based method and empirical comparison with IKONOS and QuickBird images[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2012, 6(1): 063594.
- [5] Chen W, Yan L, Li Z Q, *et al.* In-flight absolute calibration of an airborne wide-view multispectral imager using a reflectance-based method and its validation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(6): 1995-2005.
- [6] 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.
- [7] Gong Hui, Tian Guoliang, Yu Tao, *et al.* Vicarious radiometric calibration and validation of CBERS02B CCD data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(1): 1-12.  
巩慧, 田国良, 余涛, 等. CBERS02B 卫星 CCD 相机在轨辐射定标与真实性检验[J]. *遥感学报*, 2010, 14(1): 1-12.
- [8] Gao Hailiang, Gu Xingfa, Yu Tao, *et al.* HJ-1A HIS on-orbit radiometric calibration and validation research[J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, 40(11): 1312-1321.  
高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 环境卫星 HJ-1A 超光谱成像仪在轨辐射定标及真实性检验[J]. *中国科学: 技术科学*, 2010, 40(11): 1312-1321.
- [9] Han Qijin, Ma Lingling, Liu Li, *et al.* On-orbit calibration and evaluation of GF-2 satellite based on wide dynamic target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0728003.  
韩启金, 马玲玲, 刘李, 等. 基于宽动态地面目标的高分二号卫星在轨定标与评价[J]. *光学学报*, 2015, 35(7):

0728003.

- [10] Zhang Xuwen, Fu Qiaoyan, Han Qijin, *et al.* The field radiometric calibration and validation of ZY-3 multispectral sensor[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(9): 2476-2480.  
张学文, 傅俏燕, 韩启金, 等. 资源三号多光谱传感器场地辐射定标与验证[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(9): 2476-2480.
- [11] Chen Lin, Xu Na, Hu Xiuqing, *et al.* Study on orbit radiometric calibration for FY-2 visible band based on deep convective cloud[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(8): 2639-2645.  
陈 林, 徐 娜, 胡秀清, 等. 基于深对流云目标的风云二号可见光通道辐射定标[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(8): 2639-2645.
- [12] Chen L, Hu X Q, Xu N, *et al.* The application of deep convective clouds in the calibration and response monitoring of the reflective solar bands of FY-3A/MERSI (medium resolution spectral imager) [J]. Remote Sensing, 2013, 5(12): 6958-6975.
- [13] Czapla-Myers J S, Thome K J, Leisso 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.
- [14] Qiu Ganggang, Li Xin, Wei Wei, *et al.* Experiment and analysis of on-orbit radiometric calibration for remote sensors based on in-site automated observation technology[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0701001.  
邱刚刚, 李 新, 韦 玮, 等. 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[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0701001.
- [15] Gao Hailiang, Gu Xingfa, Yu Tao, *et al.* The research overview on visible and near-infrared channels radiometric calibration of space-borne optical remote sensors[J]. Remote Sensing Information, 2010(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(4): 117-128.
- [16] Sun Ling, Gu Maohua, Xu Na, *et al.* On-orbit response variation analysis of FY-3 MERSI reflective solar bands based on Dunhuang site calibration[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(7): 1869-1877.  
孙 凌, 郭茂华, 徐 娜, 等. 基于敦煌场地定标的 FY-3 MERSI 反射太阳波段在轨响应变化分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(7): 1869-1877.
- [17] 顾行发, 田国良, 于 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.
- [18] Xu Na, Hu Xiuqing, Chen Lin, *et al.* Cross-calibration of FY-2E/VISSR infrared window and water vapor channels with TERRA/MODIS[J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2012, 31(4): 319-324.  
徐 娜, 胡秀清, 陈 林, 等. 利用 MODIS 对 FY-2E/VISSR 红外窗区和水汽通道的交叉绝对辐射定标[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(4): 319-324.
- [19] Xiong X, Sun J, Barnes W, *et al.* Multiyear on-orbit calibration and performance of terra MODIS reflective solar bands [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2008, 45(4): 879-889.