

引用格式: HUANG Dong, LI Xin, ZHANG Yanna, et al. Research and Application of the Calibration of the Ground Radiometer in Dunhuang Test[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(12):1212004

黄冬,李新,张艳娜,等. 敦煌辐射校正场对地辐射计现场定标研究及应用[J]. 光子学报, 2022, 51(12):1212004

敦煌辐射校正场对地辐射计现场定标研究及应用

黄冬^{1,2,3}, 李新^{1,2}, 张艳娜^{1,2}, 韦玮^{1,2}, 张权^{1,2}

(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 中国科学院通用光学定标与表征重点实验室, 合肥 230031)

(3 中国科学技术大学, 合肥 230026)

摘要:针对实验室定标周期长、长途运输影响定标精度等问题,开展了通道式辐射计 ATR 的现场定标方法研究。在 SRBC 现场定标中引入超光谱辐照度仪自动观测数据来计算天空漫射照度,利用 SRBC 法计算了定标系数和地表反射率,将其与人工利用 ASD 型光谱仪测量的地表反射率进行对比,并对地表反射率计算的不确定度进行分析。研究表明,SRBC 法定标系数计算的 ATR 反射率与 ASD 型光谱仪测量的相对偏差优于 1.4%,反射率计算不确定度优于 2.78%~4.35%,SRBC 法在实际应用中具有较高的精度和系统优势。将 SRBC 定标系数应用于卫星自动化替代定标,近 3 年的自动化替代定标结果与 AQUA/MODIS 星上定标系数具有很好的一致性,各通道单次定标相对偏差基本在 5% 以内,平均百分偏差优于 3.58%,能很好监测跟踪卫星载荷的运行情况,验证了 SRBC 法的有效性和适用性。

关键词:对地辐射计;地表反射率;辐射计定标;自动化替代定标;气溶胶光学厚度;臭氧

中图分类号:O433;TP79

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225112.1212004

0 引言

卫星长期在轨运行时,遥感器受太空环境和元部件老化等因素的影响,会产生辐射响应衰变现象。为了满足卫星数据的定量化需求和遥感器的性能变化监测,需要对遥感器进行持续精确定标^[1-2]。对于没有星上定标装置的卫星遥感器,目前主要采用基于“反射率基法”场地替代定标方法来获取定标系数^[3-4]。传统场地替代定标方法即使用大面积均匀稳定的目标作为定标场地,在卫星过境时采用人工方式测量场地地表反射率及大气参数,且在天空晴朗无云的条件才可以获取有效数据并进行定标^[5-6]。这种方法会受到场地偏远、人员现场操作、成本高等限制,基本一年进行一次定标试验,定标频次低。随着卫星数量和载荷种类的增多,传统定标方法难以满足遥感定量化和遥感器性能长期监测应用需求。

基于高频次、高精度、低成本等考虑,近年来国际上提出了场地自动化替代定标的方法,在场地没有人员操作的情况下,利用自动化观测设备进行地表反射率和大气参数的测量,结合辐射传输模型进行定标^[7-8]。国际卫星对地观测委员会(Committee on Earth Observation Satellites, CEOS)的全球自主辐射定标场网(RadCalNet)在美国 Railroad Valley Playa、法国 La Crau、纳米比亚 Gobabeb 和中国包头四个站点均部署了自动化定标观测系统进行卫星定标和验证^[9-10]。场地自动化替代定标首先需要获得地面的目标反射率,通常使用通道式对地辐射计进行观测,其具有结构简单、运行稳定等特点。国家卫星气象中心、中国科学院安光所等单位在敦煌辐射校正场部署了包括通道式对地辐射计(Automated Test-site Radiometer, ATR)、全自动太阳光度计(Automated Precision Solar Radiometer, PSR)等自动化观测设备。地表反射率的观测精度对自动化替代定标的精度有很大影响,需要对通道式对地辐射计进行精确定标^[11]。通道式对地辐射计的定标

基金项目:国家重点研发计划(Nos. 2018YFB0504600, 2018YFB0504604),国家自然科学基金(No. 62005293)

第一作者:黄冬(1993-),男,博士研究生,主要研究方向为大气遥感和光学遥感定标。Email: hd125014@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:李新(1975-),男,研究员,博士,主要研究方向为光学结构和光学遥感定标。Email: xli@aiofm.ac.cn

收稿日期:2022-04-08;录用日期:2022-06-22

<http://www.photon.ac.cn>

方法主要为实验室定标和现场定标(Solar-Radiation-Based Calibration, SRBC)。实验室定标一般采用“灯+板”系统(lamp-panel calibration)即标准灯、标准参考板、消杂光光阑等完成定标^[12]。定标需要返回实验室完成,定标周期较长,会造成观测数据的缺失,长途的运输震动也会影响定标精度,人工进场安装与拆卸造成对地辐射计观测区域的破坏会严重影响其与卫星过境观测区域的一致性,另外在卫星自动化替代定标中,从仪器定标到计算地表反射率,需要引入标准灯和太阳两个光源,两者光谱分布存在差异。SRBC一般是利用气溶胶光学厚度、漫总比等大气参数和辐射传输模型等进行定标,可以在现场完成,定标和卫星自动化替代定标应用均将太阳作为光源,光谱分布和动态范围相近,漫总比一般在定标时采用人工手举挡板获得^[13],但是人工手举挡板时容易受到人为主观和风沙等环境因素的影响,同时,仪器定标时采用人工挡板方式获取漫总比进而得到天空漫射照度,卫星自动化替代定标应用时采用辐射传输模型估算天空漫射照度,天空漫射照度的差异可能达到50%,这些差异带来地表反射率变化高达10%^[14]。这些差异带来的地表反射率的计算误差会直接影响自动化替代定标的精度。对地辐射计的高精度测量在对遥感器各个通道衰变情况的长时间连续监视和卫星产品的反演、真实性检验等方面有着重要意义。

本文针对上述问题利用敦煌辐射校正场布设的自动化替代定标设备,开展对通道式对地辐射计现场定标的研究。在SRBC现场定标中引入超光谱辐照度仪自动化观测数据计算天空漫射照度,将ATR定标和卫星自动化替代定标使用的光源、气溶胶光学厚度、漫总比等参数的获取方式和计算过程保持一致,用SRBC法计算了定标系数和地表反射率,将计算地表反射率与人工利用ASD型光谱仪测量地表反射率进行比对,并对地表反射率计算的不确定度进行分析。以AQUA/MODIS为例,利用2018年8月到2021年9月的观测数据,比对自动化替代定标结果与星上定标系数的相对偏差和变化趋势,验证SRBC法的有效性和适用性。

1 研究方法和原理

1.1 观测仪器

2018年在敦煌辐射校正场布设了自动化定标系统,包括通道式对地辐射计(Automated Test-site Radiometer, ATR)、全自动太阳光度计(Automated Precision Solar Radiometer, PSR)和超光谱辐照度仪(Automated Hyperspectral Irradiance Meter, HIM),如图1。三台仪器均布置在敦煌场地长期运行观测,可

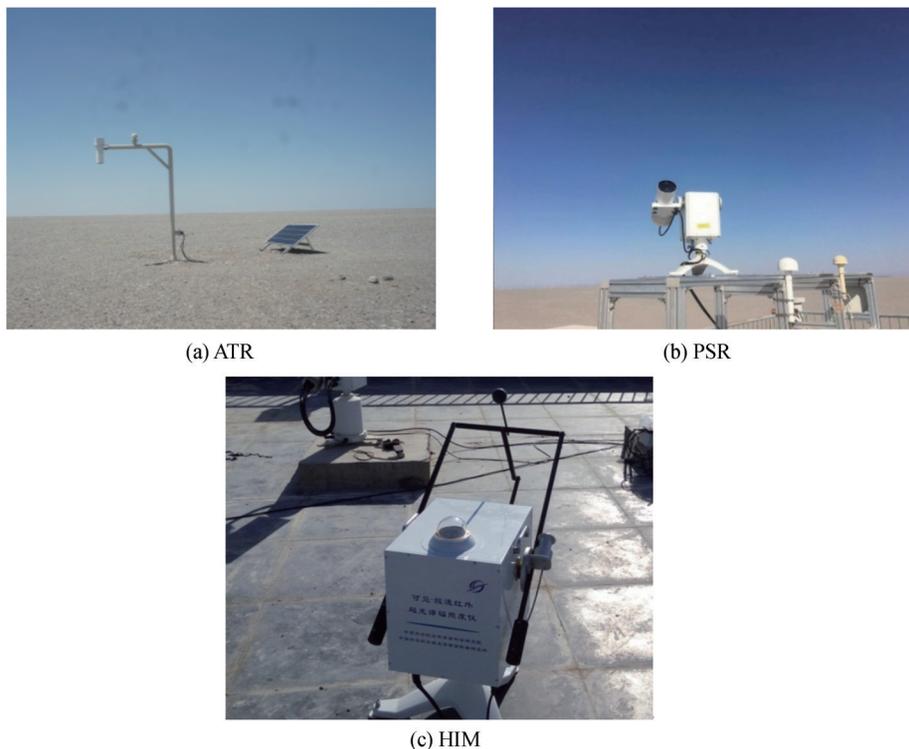


图1 自动化观测仪器

Fig.1 Automated observation instrument

以获得连续稳定的数据。观测数据通过北斗和4G远程通信模块发送到数据处理中心。

ATR仪器覆盖可见光至短波红外的8个通道,采用了硅和铟镓砷探测器,ATR光学头部在支架上以10°视场角每3 min采集一次辐亮度数据,用于测量地表反射率,ATR布置在敦煌辐射校正场中心点。PSR仪器覆盖可见光至近红外光谱的9个通道,各通道全固化观测,全自动跟踪太阳观测,同时测量地表温度、湿度、压强等环境参数,用于反演气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth,AOD)、大气水汽含量等大气参数,观测周期为3 min。HIM仪器布置在敦煌辐射校正场观测基地楼顶,通过驱动四连杆上的小球遮挡太阳直射光进入积分球玻璃罩,从而实现自动获取实时下行总照度、漫照度、直射照度、漫总比等参数,6 min测量一次。PSR、ATR、HIM均进行精密温控,技术参数如表1所示。

表1 仪器的技术参数
Table 1 Technical parameter of instruments

Parameter	PSR	ATR	HIM
Band/nm	340,380,440,500,675、 870,937,1 020,1 640	400,450,500,600,675,810、 1 000,1 550	400~2 400
Application (Band/nm)	Water vapor (937), aerosol (the other)	Surface reflectance	Irradiance, Diffuse-total ratio
FWHM/nm	2~25	15~40	≤4(400~950), ≤15(950~1 700), ≤20(1 700~2 400)

1.2 现场定标SRBC原理

SRBC方法的原理是将太阳作为辐射源,如图2所示,在参考板上形成均匀已知的辐亮度场,ATR观测参考板可获取其辐亮度对应的DN信号,从而得到辐亮度与ATR仪器观测DN值对应的定量关系。

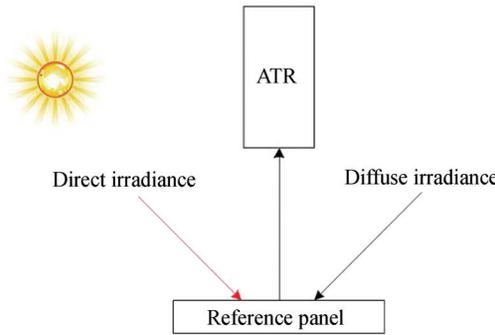


图2 SRBC示意图
Fig. 2 The diagram of SRBC

定标系数可以通过式(1)进行计算

$$C_{ATR,i} = \frac{DN_i \pi}{E(\lambda) \rho_{\text{panel}}(\lambda, \theta)} \quad (1)$$

式中, $E(\lambda)$ 为地面总辐射照度,为下行直射照度和天空漫射照度之和, θ 为太阳天顶角^[15], $\rho_{\text{panel}}(\lambda, \theta)$ 为标准参考板的反射率。

$$E(\lambda) = E_0(\lambda) S \cos \theta T + E_{\text{sky}} \quad (2)$$

式中, E_0 为大气层顶的辐射照度,来源于6SV辐射传输模型, S 为日地校正因子, E_{sky} 天空漫射照度, T 为太阳直射透过率,根据式(3)计算^[15]。

$$T = \exp(-m(\theta)\tau) \quad (3)$$

式中, $m(\theta)$ 为大气质量数, τ 大气光学厚度。

$$\tau = \tau_{\text{aer}} + \tau_{\text{ray}} + \tau_{\text{ozo}} \quad (4)$$

式中, τ_{aer} 为气溶胶光学厚度, τ_{ray} 为瑞利散射光学厚度, τ_{ozo} 为臭氧吸收,其中气溶胶光学厚度、大气水汽含量等大气参数由太阳光度计得到。非太阳光度计观测通道气溶胶光学厚度可以通过式(5)得到^[16-17]。

$$\tau_a = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (5)$$

式中, β 为大气浑浊度系数, 是 $\lambda=1 \mu\text{m}$ 处的气溶胶光学厚度, α 是波长指数。对公式两边取对数有

$$\ln \tau_a = \ln \beta - \alpha \ln \lambda \quad (6)$$

根据式(6)和观测波段的气溶胶光学厚度可以线性插值获得其他波段的气溶胶光学厚度。瑞利散射光学厚度由式(7)计算^[18]有

$$\tau_r = (0.00864 + 6.5 \times 10^{-6} H) \lambda^{-(3.916 + 0.0074\lambda + 0.05/\lambda)} \frac{P}{1013.25} \quad (7)$$

式中, H 是观测点的海拔高度(km), P 为该点的气压(Hpa), 从太阳光度计 PSR 气压传感器获取。

臭氧的光学厚度由式(8)计算^[19]有

$$\tau_o = \frac{U \times k(\lambda)}{1000} \quad (8)$$

式中, $k(\lambda)$ 为臭氧的吸收系数, U 为测量点的 O_3 总含量, 单位为 Dobson, 由 OMI 的臭氧产品获得。

利用直射照度和 HIM 漫总比计算地面总辐射照度 $E(\lambda)$, 有

$$E(\lambda) = \frac{E_0(\lambda) S \cos \theta T}{1 - \alpha} \quad (9)$$

式中, α 为漫总比。

2 定标计算

2.1 定标结果

2020年9月在合肥实验室采用“灯+板”方法完成定标。随后分别在2020年10月和2021年9月在敦煌辐射校正场采用SRBC方法完成定标。如图3(a)所示,用实验室“灯+板”的定标结果作为基准,SRBC的结果与其相比一致性较好,最大相对偏差约为3.6%。如图3(b)所示,2020年10月和2021年9月采用SRBC方法定标,操作方法、步骤和使用设备等完全一致,相对于2020年的定标结果,各通道年际变化小于1.5%,810 nm通道定标系数衰变2.3%,各通道响应相对稳定。

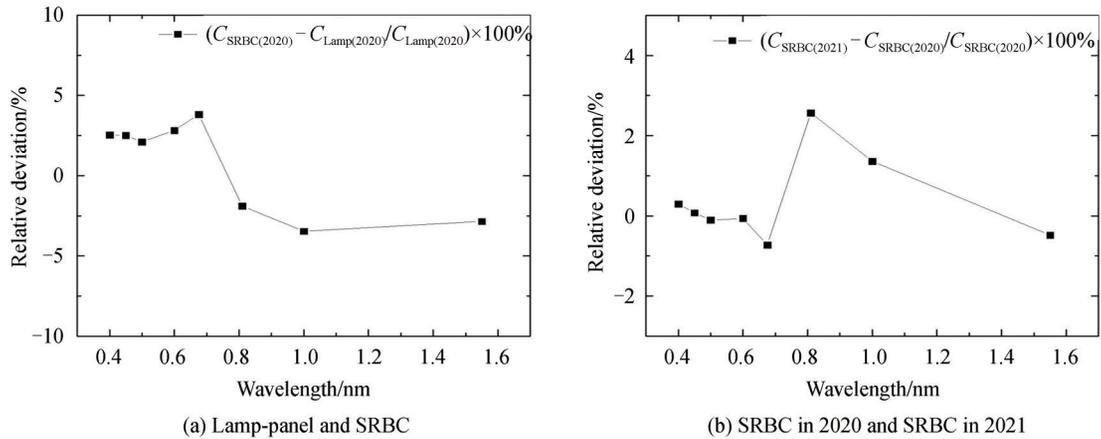


图3 定标系数相对偏差

Fig. 3 The relative deviation of calibration coefficient

2.2 反射率验证

为了验证定标效果和精度,选择一个非定标日(2020年10月20日)用ASD与ATR进行同步观测反射率比对。在ASD光纤处安装了一个 10° 的透镜,使ASD和ATR观测情况尽可能一致。在ATR 3 min测量间隔内,将ASD光纤枪头垂直放在ATR镜头下方,使之观测同一区域,连续测量5次,ASD在测量地面前后均测量了标准板共2次,标准板与ATR定标时使用的是同一块。

ASD的反射率根据式(10)计算,式中 $\text{Mean}(\text{DN}_{\text{land}})$ 为ASD 5次测量地面的平均DN值, $\text{Mean}(\text{DN}_{\text{panel}})$ 为2次测量标准板的DN值, $\rho_{\text{panel}}(\lambda, \theta)$ 为对应太阳天顶角时的反射率。

$$\rho_{ASD} = \frac{\text{Mean}(DN_{\text{land}})}{\text{Mean}(DN_{\text{panel}})} \rho_{\text{panel}}(\lambda, \theta) \quad (10)$$

根据式(1)可以得到式(11),ATR观测地表反射率为

$$\rho_{ATR,i} = \frac{DN_i \pi}{C_{ATR,i} E_i} \quad (11)$$

式(11)各参数获取、计算与SRBC定标计算方法保持一致。其中 $C_{ATR,i}$ 为SRBC的定标系数。如图4所示,利用SRBC定标系数计算的地表反射率与ASD同步观测的地表反射率具有很好的一致性,500 nm~1 000 nm的反射率相对偏差基本在1.4%以内,短波相对偏差约为3.7%。图中1 380 nm和1 870 nm附近由于水汽强吸收带的扰动影响出现明显波动。

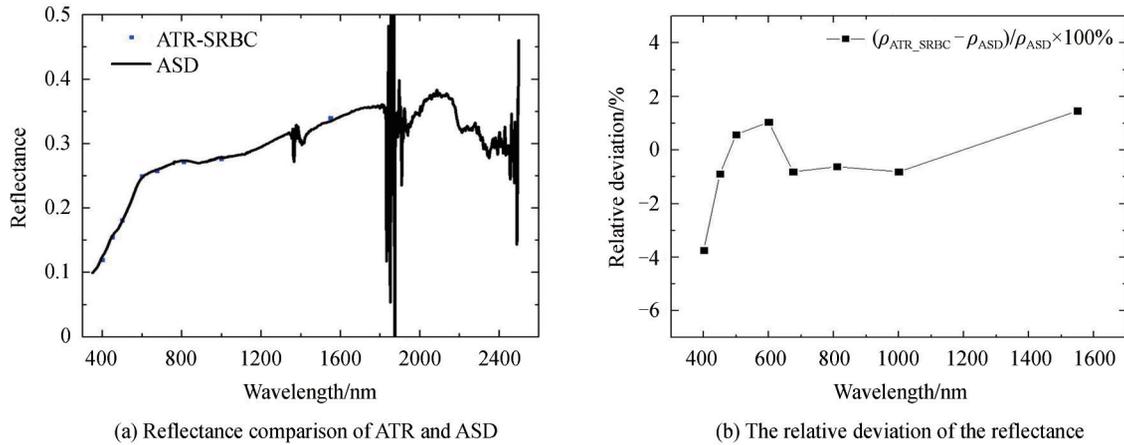


图4 反射率的测量对比

Fig. 4 Reflectance measurement comparison

2.3 地表反射率不确定度

利用SRBC(Solar Radiation-Based Calibration)定标系数计算地表反射率

根据式(1)、(2)、(9),当ATR采用SRBC定标时

$$L_1 = \frac{\rho(\lambda, \theta_1)}{\pi} E_0(\lambda) S_1 \cos \theta_1 \langle T_1(\lambda) \rangle \quad (12)$$

$$C_{ATR,i} = \frac{DN_1}{L_1} \quad (13)$$

自动化替代定标应用计算ATR通道反射率时有

$$L_2 = \frac{DN_2}{C_{ATR,i}} = \frac{DN_2}{DN_1 \pi} \frac{\rho(\lambda, \theta_1) E_0(\lambda) S_1 \cos \theta_1 \langle T_2(\lambda) \rangle}{1 - \alpha_1} \quad (14)$$

$$\rho_{ATR,i} = \frac{L_2 \pi}{E_2} = \frac{DN_2}{DN_1} \rho(\lambda, \theta_1) \frac{E_0(\lambda) S_1 \cos \theta_1 \langle T_1(\lambda) \rangle}{E_0(\lambda) S_2 \cos \theta_2 \langle T_2(\lambda) \rangle} \frac{1 - \alpha_2}{1 - \alpha_1} \quad (15)$$

式(12)~式(15)中,下标1、2分别代表ATR定标时仪器测量值和自动化替代定标计算地表反射率时的测量值, $T(\lambda)$ 为大气透过率。 $\rho(\lambda, \theta_1)$ 为标准参考板ATR定标时对应天顶角度方向的反射率, α 为漫总比, S 日地校正因子, $\rho_{ATR,i}$ 为自动化替代定标应用时ATR观测的地表反射率。

自动化替代定标计算地表反射率不确定度来源于大气层外太阳辐射照度、ATR输出信号的非线性、标准参考板的方向反射率、直射透过率和漫总比等。其中,大气层外太阳辐射照度需要从几个太阳模型中获得一个,各自具有不同的精度,不确定度约为1.1%^[20-22],本文使用的是6SV辐射传输模型中提取的大气层外太阳辐射照度,从式(15)可以发现,ATR定标和自动化替代定标应用时使用同一光源, $E_0(\lambda)$ 被消除。ATR测量的不确定度包括仪器的非稳定性和非线性,约为0.19%^[23]。标准参考板比对测量的标准为中国国家计量院传递标准,不确定度优于1%^[24]。

直射透过率 T 的不确定度主要受气溶胶光学厚度、瑞利散射、臭氧含量等大气参数的不确定度影响,其

中, AOD 来源于现场自动观测的太阳光度计 PSR。PSR 采用交叉定标的方法定标和气溶胶观测网 AERONET 推荐算法反演 AOD, AOD 的不确定度是 $<0.01(\lambda > 440 \text{ nm})$ 、 $<0.02(\lambda < 440 \text{ nm})$ ^[15], ATR 500 nm、675 nm 两个通道的 AOD 由太阳光度计测量, 其不确定度 <0.01 。PSR 9 个观测通道波段范围从 340 nm~1 640 nm, 覆盖 ATR 的观测通道, 对于 ATR 部分非太阳光度计观测通道采用式(5)插值得到, ATR 定标和自动化替代定标均选择低气溶胶、晴好的天气条件, 气溶胶类型较为稳定, 假设 ATR 非太阳光度计观测通道气溶胶光学厚度不确定度为 0.015(0.025@400 nm)。臭氧含量使用的是 OMI 数据, 该数据的不确定度为约为 3%^[25]。在可见到近红外范围内瑞利散射光学厚度相对误差小于 1.2%^[19], 1.14 km 观测点带来瑞利光学厚度变化约为 0.003 7@400 nm、0.001 5@500 nm、0.000 7@600 nm 和 0.000 089@1 000 nm, 由此可见, 短波影响稍大, ECKT F 认为瑞利散射光学厚度的不确定性来源于观测点气压变化^[26], 本文气压数据由现场气压传感器实时提供, 这部分实际影响很小。ATR 定标和自动化替代定标应用时均在晴好天气、太阳天顶角小的条件下进行, 当太阳天顶角为 40°、海拔 1.14 km、AOD 范围为 0.1~0.3(波动 0.01~0.025)、瑞利散射光学厚度波动 1.2%、臭氧含量为 300±3%DU 时计算的直射透过率受 AOD、瑞利散射和臭氧不确定度的影响约为 1.3%~3.6%, 继续计算发现随天顶角的变小而减小, 本文认为直射透过率的不确定度约为 1.3%~3.6%。

漫总比使用 HIM 获得, 当四连杆带动黑球遮挡积分球口时, 可以遮住太阳的直射照度, 但也遮住了黑球所在方向的散射光, 这一部分取决于气溶胶粒子谱、复折射指数等特性和球的大小, 黑球比较小, 不确定度约为 2%^[27]。根据式(15), 直射透过率等影响的不确定度是个相对量, 气溶胶光学厚度和漫总比等均由同一 PSR 和 HIM 测量得到, 可以消除部分系统误差, 不确定度会进一步降低。ATR 采用 SRBC 定标系数计算地表反射率总不确定度根据式(16)计算, 不确定度主要来源如表 2 所示, 总不确定度约为 2.78%~4.35%。

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial \rho}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \text{DN}_{\text{ATR}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial T}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \gamma}\right)^2} \quad (16)$$

表 2 SRBC 法定标系数不确定度

Table 2 The uncertainty estimates of the calibration coefficient for SRBC method

Source of uncertainty	Uncertainty
Reflectance of standard panel $\Delta\rho_{\text{panel}}$	1%
Measurement of ATR	0.19%
Atmospheric transmission	1.3%~3.6%
Diffuse total ratio	2%
Other uncertainties (filter transmittance, Earth-Sun distance, etc)	1%
Total	4.35%@400 nm; 3.29%@450 nm; 2.87%@500 nm; 3.23%@600 nm; 2.78%@675 nm; 3.09%

综上, 利用 SRBC 定标系数计算的地表反射率与 ASD 人工同步观测的地表反射率具有很好的一致性。SRBC 中光谱形状与动态范围与实际使用时更接近, 这种将 ATR 定标时的光源、参数观测设备、计算过程等和实际应用时保持一致的方法具有系统优势。

3 卫星定标应用

为进一步验证 SRBC 定标的有效性和适用性, 将其应用于 AQUA/MODIS 自动化替代定标^[14,28]中, AQUA/MODIS 波段参数如表 3 所示。

选取 2018 年 8 月到 2021 年 9 月的自动化观测数据, 利用 SRBC 定标方法得到的系数计算 ATR 观测通道的地表反射率, 在 2015~2021 年现场采集的地表反射率库中根据式(17)匹配最合适的参考高光谱反射率, 当 W 最小时, 对应的 k 为放缩平移系数, 用平移系数 k 对参考高光谱反射率进行放缩平移得到实时高光谱地表反射率^[14]。

表3 AQUA/MODIS 波段参数
Table 3 The band parameters of AQUA/MODIS

Band/nm	Bandwidth/nm	Signal to noise ratio
Ch1	620~670	128
Ch2	841~876	201
Ch3	459~479	243
Ch4	545~565	228
Ch5	1 230~1 250	74
Ch6	1 628~1 652	275
Ch7	2 105~2 135	110
Ch8	405~420	880
Ch9	438~448	838
Ch10	483~493	802
Ch11	526~536	754
Ch12	546~536	750

$$W = \sqrt{\sum_{i=1}^8 \frac{1}{\sigma_i} [\rho_i - (k + \rho_{Ref_i})]^2} \quad (17)$$

式中, i 为 ATR 的通道数, ρ_i 和 σ_i 为卫星过境前后 6 min 的 ATR 观测的地表反射率的平均值和标准偏差, ρ_{Ref_i} 为参考高光谱反射率在 ATR 通道卷积后的等效反射率, k 为放缩平移系数。利用 BRDF 模型对实时高光谱地表反射率进行角度校正得到卫星过境时观测方向的高光谱地表反射率^[29],

$$R_M(\theta_v, \theta_s, \varphi) = f_{iso} + f_{geo} k_{geo}(\theta_v, \theta_s, \varphi) + f_{vol} k_{vol}(\theta_v, \theta_s, \varphi) \quad (18)$$

$$\rho_v(\theta_v, \theta_s, \varphi) = \frac{R_M(\theta_v, \theta_s, \varphi)}{R_M(0, \theta_s, 0)} \cdot \rho_{AVCS} \quad (19)$$

式中, $\varphi = \varphi_v - \varphi_s$, $\theta_v, \varphi_v, \theta_s, \varphi_s$ 分别为卫星观测天顶角、方位角和太阳天顶角、方位角。 $R_M(\theta_v, \theta_s, \varphi)$ 为二向反射率, $f_{iso}, f_{vol}, k_{vol}$ 分别为各向均匀散射、几何光学散射、体散射在这三部分所占比例。 k_{geo} 为几何光学核, k_{vol} 为体散射核。 ρ_{AVCS} 为上文放缩后得到的地表高光谱反射率, $\rho_v(\theta_v, \theta_s, \varphi)$ 为 BRDF 校正后卫星过境时观测方向的高光谱地表反射率。

通过 ATR 观测的多通道地表反射率和参考地表高光谱反射率放缩平移后得到实时地表高光谱反射率, 如图 5 所示, 为 2018 年 8 月 7 日和 2020 年 4 月 26 日 AQUA/MODIS 过顶时实时地表高光谱反射率经过 BRDF 方向校正得到的卫星观测方向的高光谱地表反射率。

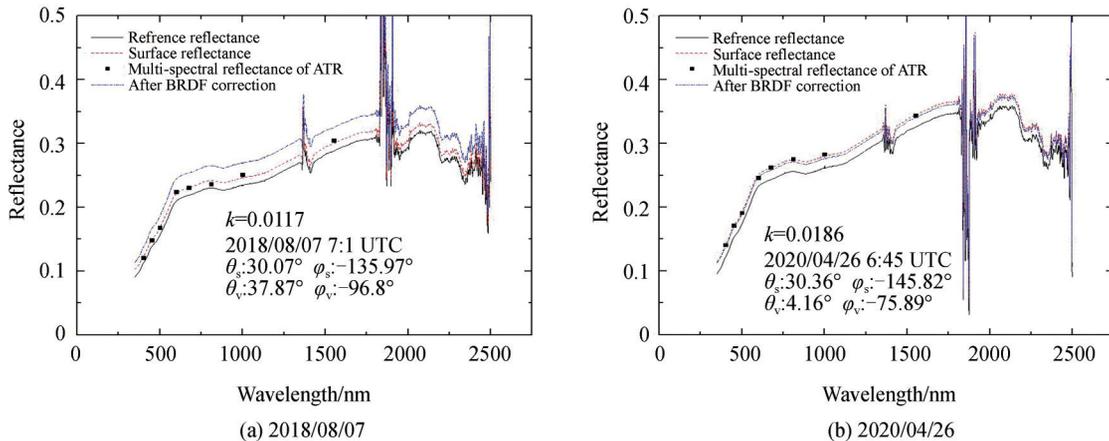


图5 卫星观测方向地表反射率
Fig. 5 The Surface reflectance in the direction of satellite transit observation

将卫星观测方向的高光谱地表反射率、大气参数、几何参数、日期等输入6S模型计算得到高光谱表观反射率,结合AQUA/MODIS的通道光谱响应函数通过式(20)进行卷积,获得AQUA/MODIS各通道的表观反射率。

$$\rho_{\text{TOA}_i} = \frac{\int \rho_{\text{TOA}} T(\lambda) d\lambda}{\int T(\lambda) d\lambda} \quad (20)$$

式中, ρ_{TOA_i} 是AQUA/MODIS通道表观反射率, ρ_{TOA} 是高光谱表观反射率, $T(\lambda)$ 是AQUA/MODIS的通道光谱响应函数。

考虑到敦煌辐射校正场的均匀性,选择敦煌辐射校正场 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 的中心位置为中心像元,中心周围 3×3 像元的窗口平均DN进行星地匹配。为保证观测数据质量和有效性,对观测数据进行质量控制,卫星观测方向,卫星数据选取的像元变异系数小于2.5%,卫星观测天顶角 $< 40^\circ$;用550 nm AOD小于0.3和卫星过境前后45 min ATR观测信号对数与大气质量数线性相关性大于0.99来进行晴好天气筛选。如图6所示,2018年8月7日,AQUA/MODIS过境前后ATR观测 $\ln(\text{DN})$ 与大气质量数 m 线性相关性超过0.997。

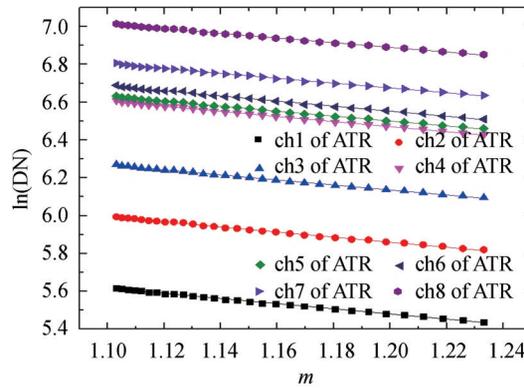


图6 ATR观测 $\ln(\text{DN})$ 与大气质量数 m 线性相关性

Fig. 6 The linear correlation between the logarithm of DN observed by ATR and air mass

卫星的定标系数用式(21)来计算有

$$k = \frac{\rho_{\text{TOA}_i} S \cos \theta_s}{\text{DN}} \quad (21)$$

式中, ρ_{TOA_i} 为AQUA/MODIS通道表观反射率, DN为卫星通道观测净信号, θ_s 为太阳天顶角, S 为日地距离校正因子。

连续近3年的观测数据,自动化替代定标的定标系数与星上定标系数相对偏差由式(22)计算有

$$\text{Relative Deviation} = (\text{Measured} - \text{Modis}) / \text{Modis} \times 100\% \quad (22)$$

结果如图7所示,自动化替代定标的定标系数与星上定标系数随时间的变化趋势基本一致,能很好监测卫星载荷在轨运行性能状况。其中部分时间上的数据缺失主要有:1)自动化设备观测问题,如ATR信号和温控异常、HIM四连杆跟踪驱动异常等;2)设备定标,返回实验室进行辐射定标等;3)环境问题,包括敦煌场天气变化或者受沙尘的影响较为严重,使得天气稳定性、气溶胶含量等不满足定标条件,冬季春季积雪,造成地表反射率异常偏大,卫星观测角度偏大等。

图8是AQUA/MODIS前12通道自动化替代定标系数与其星上定标系数的相对偏差随时间的变化,从中可以看出各通道单次定标相对偏差基本在5%以内, ch8-ch12通道定标相对偏差优于3%,其中ch11和ch12通道是海洋水色通道,过境敦煌大部分时间处于饱和状态,数据量较少,集中在冬季,低频率的传统人工定标很难及时完成。图9是各通道自动化替代定标系数与其星上定标系数的平均百分偏差,平均图中的不确定度条是所有数据平均值的 1σ 标准偏差,如图9所示,除了ch7 2105~2135nm通道以外,其余通道的平均百分偏差范围为-0.46%到3.58%之间,百分偏差不确定条基本在3%以下。2105~2135 nm通道误差可能是该通道处于ATR 400~1550 nm波段观测范围外,在高光谱反射率放缩过平移程中无长波的权重参与放缩匹配,同时敦煌戈壁滩该通道信号非常低且少量的水汽吸收扰动也会产生影响。

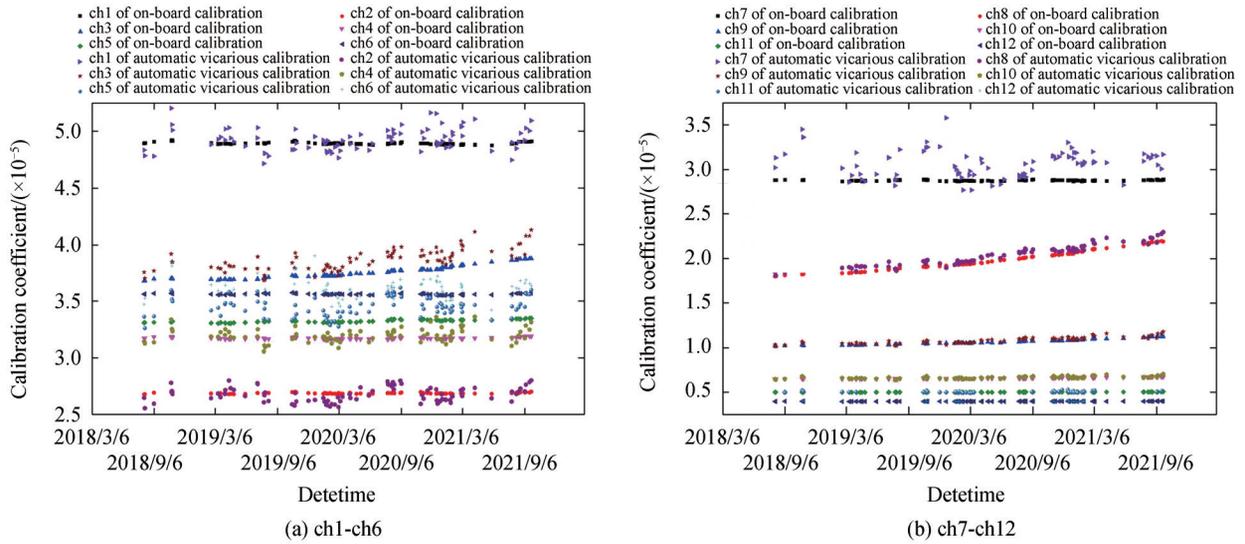


图7 自动化替代定标与AQUA/MODIS星上定标系数对比

Fig. 7 Comparison of calibration coefficient of AQUA/MODIS between on-board calibration and the automated vicarious calibration

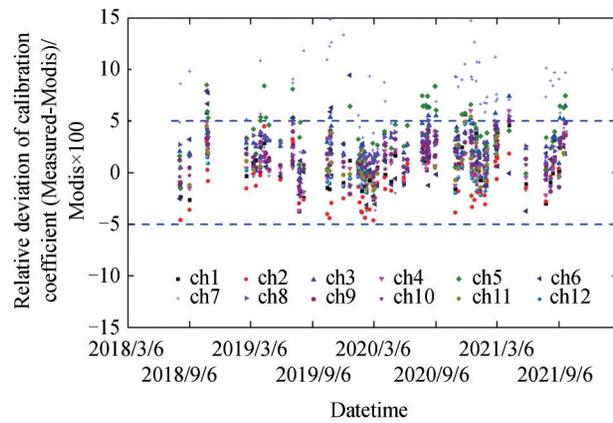


图8 自动化替代定标与AQUA/MODIS星上定标系数相对偏差

Fig. 8 The relative deviation of calibration coefficient of AQUA/MODIS between on-board calibration and automated vicarious calibration

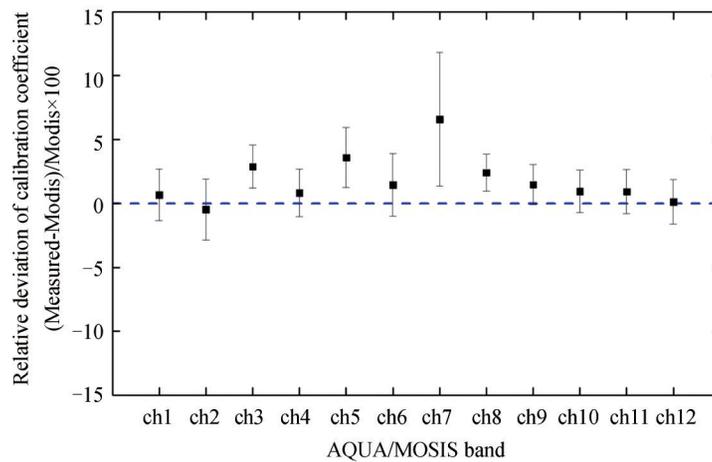


图9 自动化替代定标与AQUA/MODIS星上定标系数平均相对偏差

Fig. 9 The average relative deviation of AQUA/MODIS between on-board calibration and the automated vicarious calibration

4 结论

针对自动化替代定标中ATR定标周期长、运输过程影响精度等问题,本文利用ATR观测数据,开展了观测通道的现场定标方法研究。在SRBC定标中引入超光谱辐照度仪自动观测数据来计算天空漫射照度,将ATR定标过程和卫星自动化替代定标应用过程保持一致,SRBC法定标系数计算ATR反射率与人工ASD测量相对偏差优于1.4%,计算反射率不确定度优于2.78%~4.35%,SRBC法在实际应用中具有较高的精度和系统优势。将SRBC定标系数应用于卫星自动化替代定标,与AQUA/MODIS星上定标系数比较,近3年的运行观测结果表明敦煌自动化替代定标能很好监测跟踪卫星载荷的运行情况,各通道单次定标相对偏差基本在5%以内,平均百分偏差优于3.58%,SRBC法具有较好的有效性和适用性。未来将进一步提高自动化替代定标设备的稳定性,提高定标精度,具体研究分析各种卫星载荷的运行和衰变情况。

参考文献

- [1] LIU Y K, MA L L, WANG N, et al. On-orbit radiometric calibration of the optical sensors on-board SuperView-1 satellite using three independent methods[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 11085-11105.
- [2] CZAPLA-MYERS J, ANDERSON N, THOME K, et al. The absolute radiometric calibration of the Landsat 8 Operational Land Imager using the reflectance-based approach and the Radiometric Calibration Test Site (RadCaTS)[C]. SPIE, 2015.
- [3] JIN C, AHN H, SEO D, et al. Radiometric calibration and uncertainty analysis of KOMPSAT-3A using the reflectance-based method[J]. *Sensors*, 2020, 20(9): 2564.
- [4] KUESTER M A, OCHOA T, JORDAN J, et al. Transfer of reflectance-based absolute radiometric calibration of GE01, WV02 and WV03 to WV04 using the Libya-4 Pseudo invariant calibration site in an empirical top-of-atmosphere reflectance model[EB/OL]. <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1407&context=calcon>.
- [5] TAN K, WANG X, NIU C, et al. Vicarious calibration for the AHSI instrument of Gaofen-5 with reference to the CRCS Dunhuang test site[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 59(4): 3409-3419.
- [6] MA L, ZHAO Y, WOOLLIAMS E R, et al. Uncertainty analysis for RadCalNet instrumented test sites using the Baotou sites BTCN and BSCN as examples[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(11): 1696.
- [7] BOUVET M, THOME K, BERTHELOT B, et al. RadCalNet: a radiometric calibration network for earth observing imagers operating in the visible to shortwave infrared spectral range[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(20):2401.
- [8] 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.
- [9] CZAPLA-MYERS J S, ANDERSON N J. Intercomparison of earth-observing sensors using the Radiometric Calibration Test Site (RadCaTS)[C]. 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2018.
- [10] ANDERSON N, CZAPLA-MYERS J, LEISSO N, et al. Design and calibration of field deployable ground-viewing radiometers[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(2):231-240.
- [11] 韦玮. 基于全球定标网的卫星遥感器长时间序列定标方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2017.
- [12] JOHNSON B C, BROWN S W, YOON H W. Radiometric calibration history of visible and near-infrared portable radiometers[J]. *Metrologia*, 2000, 37(5): 423.
- [13] CZAPLA-MYERS J S. Automated ground-based methodology in support of vicarious calibration[M]. The University of Arizona, 2006.
- [14] CZAPLA-MYERS J, MCCORKEL J, ANDERSON N, et al. The ground-based absolute radiometric calibration of Landsat 8 OLI[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(1): 600-626.
- [15] HOLBEN B N, ECK T F, SLUTSKER I, et al. AERONET—a federated instrument network and data archive for aerosol characterization[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(1):1-16.
- [16] CHE H, GUI K, CHEN Q, et al. Calibration of the 936nm water-vapor channel for the China aerosol remote sensing NETWORK (CARNET) and the effect of the retrieval water-vapor on aerosol optical property over Beijing, China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2016:743-753.
- [17] CHEN Xinmin, LI Jianyu, WEI heli, et al. Extraction of atmospheric transmittance of laser waveband using sun-photometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019(S2): 90-97.
陈新民, 李建玉, 魏合理, 等. 用太阳光度计获取激光波段大气透过率[J]. *红外与激光工程*, 2019(S2): 90-97.
- [18] LIOU K N. An introduction to the atmospheric radiation [M]. American Academic Press, 2002.
- [19] HU Fangchao, ZAHNG Bing, CHEN Zhengchao, et al. Improved algorithm for the retrieval of aerosol optical depth using the sunphotometer CE 318 [J]. *Optic Technique*, 2007, 33(S1):38-43.
胡方超, 张兵, 陈正超, 等. 利用太阳光度计CE318反演气溶胶光学厚度改进算法的研究[J]. *光学技术*, 2007, 33(S1):38-43.

- [20] PINTO C T, CHITTIMALLI S, LEIGH L, et al. A reflectance-based cross calibration of the Landsat sensors [C]. Earth Observing Systems XXII, International Society for Optics and Photonics, 2017, 10402: 104021C.
- [21] GUEYMARD C A. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models [J]. Solar Energy, 2004, 76(4): 423-453.
- [22] ELTBAAKH Y A, RUSLAN M H, ALGHOUL M A, et al. Measurement of total and spectral solar irradiance: Overview of existing research [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(3): 1403-1426.
- [23] QIU G G, LI X, ZHENG X B. Autonomous vicarious calibration based on automated test-site radiometer [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(12): 121201.
- [24] 许和鱼. 基于双太阳漫反射板上定标方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017: 50-62.
- [25] BHARTIA P K. OMI algorithm theoretical basis document volume II [C]. OMI Ozone, 2002.
- [26] ECKT F, HOLBEN B N, REID J S, et al. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, 104(D24): 31333-31349.
- [27] ZHANG Quan, LI Xin, ZHANG Yanna, et al. Opto-mechanical design of unattended irradiance spectroradiometer in reflective solar bands [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 354-363.
张权, 李新, 张艳娜, 等. 无人值守的太阳反射波段超光谱辐照度仪的光机系统设计 [J]. 光学学报, 2019, 39(3): 354-363.
- [28] CZAPLA-MYERS J, THOME K, WENNY B, et al. Railroad Valley Radiometric Calibration Test Site (RadCaTS) as part of a Global Radiometric Calibration Network (RadCalNet) [C]. 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2020.
- [29] YU Tanqi, WEI Wei, ZHANG Yanna, et al. Analysis of the BRDF characteristics of Dunhuang radiometric calibration site in the spring [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(6): 0612004.
余谭其, 韦玮, 张艳娜, 等. 敦煌辐射校正场春季 BRDF 特性分析 [J]. 光子学报, 2018, 47(6): 0612004.

Research and Application of the Calibration of the Ground Radiometer in Dunhuang Test

HUANG Dong^{1,2,3}, LI Xin^{1,2}, ZHANG Yanna^{1,2}, WEI Wei^{1,2}, ZHANG Quan^{1,2}

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

(2 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(3 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: When the satellite is in orbit for a long time, the remote sensor will be affected by factors such as the space environment and the aging of components, which will cause the phenomenon of radiation response decay. To meet the quantitative requirements of satellite data and the monitoring of remote sensor performance change, continuous and precise calibration of remote sensors is required. At present, the vicarious calibration based on the reflectance-based method is widely used. A large area of uniform and stable targets are used as the radiometric calibration site. When the satellite transit, the surface reflectance and atmospheric parameters of the site are synchronously measured manually, and the apparent reflectance is calculated in combination with the radiative transfer model, to obtain the calibration coefficient of the satellite sensors. It takes much time, manpower, material and financial resources to complete an effective calibration test. At the same time, due to the limitations of weather conditions, the calibration frequency is basically maintained at the level of once a year. With the increase in the number and types of optical satellites, the radiometric calibration based on the traditional vicarious calibration method can not meet the needs of remote sensing quantification in time. In recent years, a method of automated vicarious calibration based on high frequency, high precision, low cost and other considerations has been adopted internationally. This method uses unattended and automated observation equipment to measure the surface reflectance and atmospheric parameters and combines with the radiation transfer model to realize the high-time calibration of remote sensors. The automated vicarious calibration observation network such as the Radiometric Calibration Network and the Automated Vicarious Calibration System has been deployed in

Railroad Valley Playa in the United States, La Crau in France, Baotou in China, Dunhuang in China, etc. for satellite calibration and verification. Surface reflectance is an important parameter for automated vicarious calibration. Considering the long-term field observation and operation stability, the channel-type radiometer is usually used. The automated test-site radiometer is the core equipment of the automatic vicarious calibration system in the Dunhuang radiometric calibration test site, which provides surface reflectance parameters. In order to ensure the high-precision measurement of reflectance in the long-term automated vicarious calibration process, the high-precision calibration of the automated test-site radiometer is generally completed in the laboratory. The calibration process needs to be completed by returning to the laboratory. The long calibration cycle will cause the loss of observation data, and long-distance transportation vibration will also affect the calibration accuracy. The damage to the automated test-site radiometer observation area caused by manual mobilization, installation and disassembly will seriously affect its consistency with the satellite transit observation area. In addition, light sources standard lamp and sun are used for instrument calibration and surface reflectance calculation, respectively in the satellite automated vicarious calibration. There are differences in spectral distribution between the two. To solve these problems, the on-site calibration method of the channel-type automated test-site radiometer was studied. The automatic observation data of the hyperspectral irradiance meter was introduced into the solar-radiation-based calibration method to calculate the sky diffuse illuminance. The acquisition methods and calculation processes of light source, aerosol optical thickness, diffuse to total ratio and other parameters used in the calibration of the automated test-site radiometer and satellite automated vicarious calibration were consistent. The solar-radiation-based calibration method is used to calculate the calibration coefficient and surface reflectance, and the calculated surface reflectance is compared with the manually measured surface reflectance using ASD spectrometer. Then the uncertainty of surface reflectance calculation is analyzed. The results show that the relative deviation between the reflectance of the automated test-site radiometer calculated by the solar-radiation-based calibration method and the reflectance of artificial ASD measurement is better than 1.4%, and the uncertainty of reflectance calculation is better than 2.78%~4.35%. Solar-radiation-based calibration method has high accuracy and system advantages in practical application. The calibration coefficient of the automated test-site radiometer calculated by the solar-radiation-based calibration method is applied to the satellite's automatic vicarious calibration. The automatic vicarious calibration results in recent three years are in good agreement with the AQUA/MODIS on-board calibration coefficient. The relative deviation of single calibration of each channel is basically within 5%, and the average percentage deviation is better than 3.58%. It can monitor and track the operation of satellite load, and verify the effectiveness and applicability of the SRBC method.

Key words: Ground radiometer; Surface reflectance; Radiometer calibration; Automatic vicarious calibration; Aerosol optical depth; Ozone content

OCIS Codes: 120.0280; 150.1488; 230.0040; 010.1100; 280.1310