

通道式辐射计自动观测数据的反射率光谱拓展方法

马志宏^{1,2}, 马灵玲^{1*}, 刘耀开¹, 赵永光¹, 王宁¹, 李传荣¹, 唐伶俐¹

¹中国科学院光电研究院中国科学院定量遥感信息技术重点实验室, 北京 100094;

²中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049

摘要 为了适应光谱特性、观测角度不同的卫星载荷定标需求,提出了一种考虑地表双向反射分布函数特性(BRDF)的通道式辐射计光谱反射率拓展方法。利用国家高分辨遥感综合定标场的星地观测数据,对提出的自动观测数据光谱拓展方法进行验证。结果表明,通道反射率光谱拓展结果与地物光谱仪实测值相比平均相对差异为 2.67%;而与 Sentinel-2A/B 卫星实际观测结果相比,各波段差异均在 10%以内。进一步开展了不确定性分析,利用提出的光谱拓展方法获得的地表光谱反射率不确定度为 3.34%,基于该方法的 Sentinel-2A/B 蓝、绿、红、近红外波段辐射定标总不确定度分别为 3.35%,3.77%,4.10%,4.29%。

关键词 遥感;通道式辐射计;辐射定标;光谱拓展;反射率;双向反射分布函数

中图分类号 TP79

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0728004

A Method for Hyperspectral Reflectance Reconstruction from Automatic Observation with Multispectral Radiometer

Ma Zhihong^{1,2}, Ma Lingling^{1*}, Liu Yaokai¹, Zhao Yongguang¹,

Wang Ning¹, Li Chuanrong¹, Tang Lingli¹

¹Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing Information Technology, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A method for hyperspectral reflectance reconstruction from observed data with an automatic multispectral radiometer is presented. The surface bidirectional reflectance distribution function effect is considered in our method in order to meet the on-orbit calibration requirement of sensors with different spectral characteristics and viewing angles. The satellite-ground synchronous observation data from the National Calibration and Validation Site for High Resolution Remote Sensors are used to validate the proposed method. The results show that the average relative difference between the reconstructed hyperspectral reflectance and the measured reflectance by a field spectrometer is about 2.67%. Compared with observation values of Sentinel-2A/B, the difference is less than 10% for each band. Furthermore, the results of uncertainty analysis show that uncertainty of hyperspectral reflectance obtained by the proposed method is about 3.34%. The overall uncertainty of radiometric calibration at blue, green, red, and near-infrared bands of Sentinel-2A/B is about 3.35%, 3.77%, 4.10%, and 4.29%, respectively.

Key words remote sensing; multispectral radiometer; radiometric calibration; spectral reconstruction; reflectance; bidirectional reflectance distribution function

OCIS codes 280.4788; 120.0280; 300.6170; 300.6490

1 引 言

场地自动化替代定标可提供统一的地面辐射测量基准,有利于保证不同卫星载荷定标结果的一致

性,已成为场地辐射定标发展的新趋势。近年来国际上提出的场地自动化替代定标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,进而通过辐射传输模拟获取可与卫星观测数据直接比对的

收稿日期: 2019-02-01; 修回日期: 2019-03-04; 录用日期: 2019-03-21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504800,2018YFB0504804,2018YFB0504900)、中国科学院国际合作大科学计划培育专项(181811KYBS20160040)、国家自然科学基金(41601395)、高分重大专项(30Y20A02900317/18)

* E-mail: llma@aoe.ac.cn

地基辐射测量基准^[1-2]。为了适应光谱特性各异的不同卫星载荷,场地自动化替代定标首先需要获得高光谱分辨率的地面目标特性。当前最有代表性的是国际卫星对地观测委员会(CEOS)的全球自主辐射定标场网(RadCalNet),基于常态化运行的自动观测系统,目前可提供每半小时一次、10 nm 间隔的大气顶层光谱辐亮度标准辐射定标产品^[3]。考虑到自动化观测设备长期在环境多变的野外定标场工作,首批 4 个示范场中除了我国科技部“国家高分辨遥感综合定标场”(简称“包头场”)采用光谱式自动观测系统外,其余的美国 Railroad Valley Playa、法国 La Crau、欧空局 Gababeb 均采用结构相对简单、运行稳定性较高的通道式辐射计作为地表特性自动观测系统的核心部件^[4-7],进而将通道式自动数据拓展至高光谱反射率。

通道式辐射计自动观测数据光谱拓展的基本思路是选取光谱仪实测高光谱数据的统计均值作为参考反射率,卷积至通道式辐射计光谱响应,计算其与通道式自动观测反射率之间的差异校正参考反射率,由此实现通道式观测数据光谱拓展。Czapla-Myers 等^[8]和 Li 等^[9]利用野外光谱仪实测获得参考光谱反射率,分别在美国 Railroad Valley Playa 定标场和我国敦煌场利用通道式辐射计自动观测数据,探索了面向 Landsat 8 和 MODIS 卫星载荷的场地自动化替代定标方法。上述方法均基于地表反射率波谱形状不变的假设,实际上自然地物目标在不同观测几何及太阳角度下反射率呈现不同程度的差异。如基于包头场人工砾石靶标的双向反射分布函数(BRDF)的分析表明,在观测天顶角变化($0^\circ \sim 30^\circ$)、太阳天顶角变化($0^\circ \sim 60^\circ$)和相对方位角变化($0^\circ \sim 180^\circ$)下 BEDF 的平均差异分别为 8.74%, 4.84%, 6.32%^[10]。可见,选用单一固定的参考反射率难以精细反映不同时刻地物目标的双向反射特性。为了进一步提升自动化替代定标精度,有必要在光谱拓展过程中考虑观测几何变化的影响,以准确补偿自动观测系统只能垂直观测的欠缺。

本文引入考虑太阳角度变化影响的双向参考光谱反射率,结合通道式辐射计光谱响应曲线计算等效通道参考反射率,与自动测量获得的通道式反射率联合求解光谱拓展比值的校正系数,实现考虑地表 BRDF 效应的通道式自动观测数据光谱反射率拓展。进一步利用在包头场近期构建的通道式观测辐射计自动测量数据光谱拓展结果,与光谱反射率实测数据进行比对分析,并基于提出的光谱反射率

拓展方法对 Sentinel-2A/B 遥感数据进行应用验证和定标不确定性分析。

2 考虑 BRDF 的光谱拓展原理及方法

理论上,以双向参考光谱反射率与通道光谱响应曲线卷积而得的双向通道反射率,与通道式辐射计测量的通道式反射率应是相等的。方法流程如图 1 所示,基本思路如下。

1) 双向参考光谱反射率旨在消除太阳及观测角度变化对地表反射率的影响,假设不同时刻波谱自身形状固定,利用多角度光谱反射率观测值建立 BRDF 模型,结合观测时刻太阳角度和观测角度推算地物双向参考光谱反射率。

2) 实测通道反射率由该通道式辐射计测量的地表反射辐亮度与大气辐射传输模拟的到达地表的通道总辐照度计算得到。

3) 将多组参考光谱反射率与实测通道式反射率联立求解,得到光谱拓展比值系数,实现了通道式反射率向连续光谱反射率的拓展。

2.1 双向参考光谱反射率计算

双向反射分布函数 $f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 描述一个表面的方向性反射率特性,是由太阳入射角度和传感器观测角度组成的函数,定义为沿天顶角 θ_r , 方位角 φ_r 方向从物体表面反射的光谱辐亮度与从天顶角 θ_i , 方位角 φ_i 方向入射的光谱辐照度之比^[11],即

$$f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{L_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{E_i(\theta_i, \varphi_i)} = \frac{L_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{\pi L_{\text{ref}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)} = R(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) / \pi, \quad (1)$$

式中: θ, φ 分别为天顶角和方位角;下标 i, r 分别表示入射和出射; $L_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为出射辐亮度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$); $L_{\text{ref}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为入射辐亮度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$); $E_i(\theta_i, \varphi_i)$ 为入射辐照度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$); $R(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为无量纲双向反射因子(BRF),也即双向反射率。实际测量中很难准确测得目标的 BRDF,因此通常使用易于测量的 BRF,即(1)式中的 $R(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 。

从(1)式可以看出,BRF 是 BRDF 的 π 倍。在众多 BRDF 模型中,半经验核驱动模型因简单快捷且具有一定物理意义而被广泛应用。半经验核驱动模型形式表示为

$$R(\theta_i, \theta_r, \varphi, \lambda) = f_{\text{iso}}(\lambda) + f_{\text{vol}}(\lambda)K_{\text{vol}}(\theta_i, \theta_r, \varphi, \lambda) + f_{\text{geo}}(\lambda)K_{\text{geo}}(\theta_i, \theta_r, \varphi, \lambda), \quad (2)$$

式中: K_{vol} 为体散射核; K_{geo} 为几何光学核; $f_{\text{iso}}, f_{\text{vol}}$

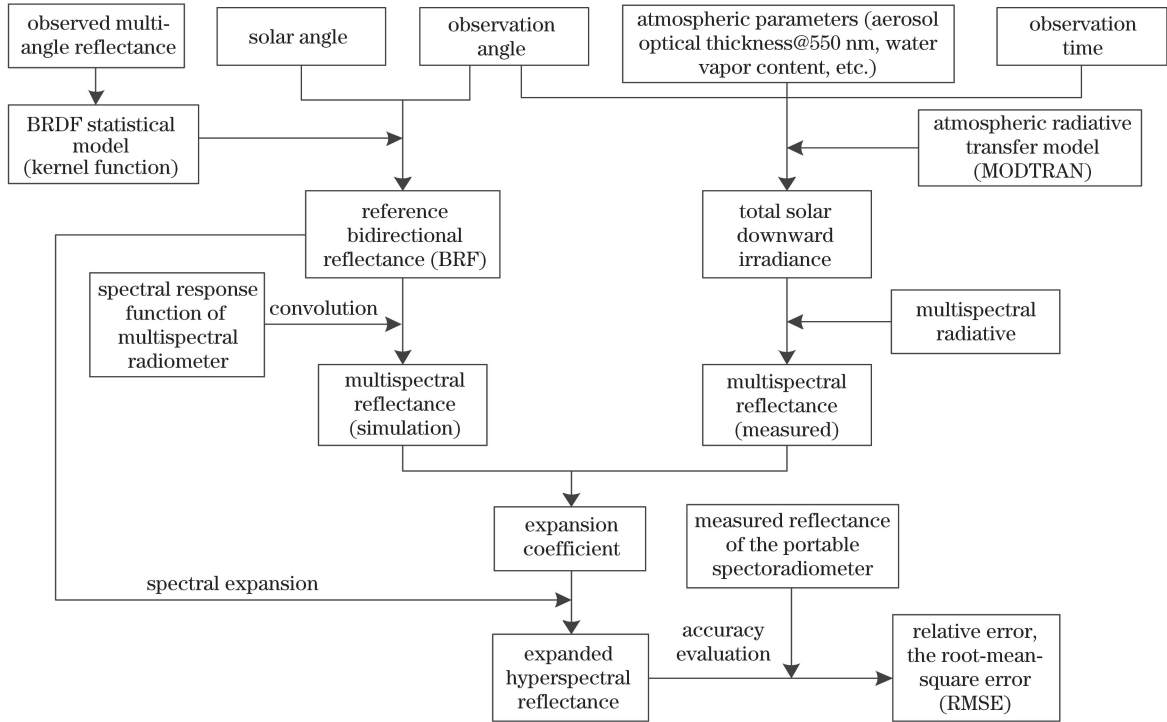


图 1 通道式反射率光谱拓展流程

Fig. 1 Flow of spectral reconstruction for multispectral reflectance

和 f_{geo} 分别为各向同性散射、体散射和几何光学散射的权重; λ 为波长。Roujean 模型(RM)是目前常用的半经验模型之一,其体散射核和几何光学核的表达式为^[12]

$$K_{vol}^{RM}(\theta_i, \theta_r, \varphi) = \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{1}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} \cdot \left[\left(\frac{\pi}{2} - \xi \right) \cos \xi + \sin \xi \right] - \frac{1}{3}, \quad (3)$$

$$K_{geo}^{RM}(\theta_i, \theta_r, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \cdot [(\pi - \varphi) \cos \varphi + \sin \varphi] \tan \theta_i \tan \theta_r - \frac{1}{\pi} \cdot (\tan \theta_i + \tan \theta_r + \sqrt{\tan^2 \theta_i + \tan^2 \theta_r - 2 \tan \theta_i \tan \theta_r \cos \varphi}), \quad (4)$$

式中: ξ 为散射相角,即入射方向与观测方向的夹角,计算公式为

$$\cos \xi = \cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos \varphi. \quad (5)$$

选用 Roujean 模型,通过对地物进行多角度测量获取不同太阳角度和观测角度下的多组双向反射率 $R(\theta_i, \theta_r, \varphi, \lambda)$,利用最小二乘方法拟合得到系数 f_{iso} , f_{vol} 和 f_{geo} ,获得最优权重系数组合,构建半经验 BRDF 模型,并进一步结合观测时刻的观测几何参数,由 BRDF 模型计算得到双向参考光谱反射率。

2.2 通道式地表反射率计算

通道式地表反射率由通道式辐射计观测辐亮度

与太阳下行总辐亮度计算得到。

$$\rho_{TD_i} = L_{TD_i} / L_{E_{TD_i}}, \quad (6)$$

$$L_{E_{TD_i}} = E_{TD_i} / \pi, \quad (7)$$

$$E_{TD_i} = \frac{\int E_{TD}(\lambda) \cdot r_i(\lambda) d\lambda}{\int r_i(\lambda) d\lambda}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 8, \quad (8)$$

式中: i 为通道数; ρ_{TD_i} 为通道式辐射计 i 通道的反射率; L_{TD_i} 为 i 通道的观测辐亮度; $L_{E_{TD_i}}$ 为 i 通道太阳下行总辐亮度; E_{TD_i} 为 i 通道的太阳下行总辐照度; $E_{TD}(\lambda)$ 为波长 λ 处的太阳下行总辐照度,由 550 nm 气溶胶光学厚度、大气柱状水汽含量等观测时刻的大气参数输入大气辐射传输模型(MODTRAN5)模拟得到; $r_i(\lambda)$ 为通道式辐射计 i 通道的通道响应函数。

2.3 光谱拓展比值系数计算

利用通道式辐射计光谱响应函数,对考虑 BRDF 效应计算得到的参考反射率进行卷积运算,得到等效通道式反射率,即

$$\rho_{BRF_i} = \frac{\int \rho_{BRF_\lambda} \cdot r_i(\lambda) d\lambda}{\int r_i(\lambda) d\lambda}, \quad (9)$$

式中: ρ_{BRF_i} 为 Roujean 模型计算得到的等效 i 通道的反射率; $r_i(\lambda)$ 为通道式辐射计在 i 通道的响应函

数; $\rho_{\text{BRF},\lambda}$ 为Roujean模型计算得到的连续光谱反射率。

将等效通道式反射率与利用通道式辐射计观测数据计算所得反射率在对应通道上的比值均值作为系数,对参考反射率进行校正,实现由通道式反射率向连续光谱反射率的拓展。在假设波谱形状不变的前提下,相对差异体现为波谱整体性的拉伸,用光谱拓展比值系数表示为

$$\rho_{\text{exp}}(\theta_i, \theta_r, \varphi) = \rho_{\text{BRF}}(\theta_i, \theta_r, \varphi) \cdot \eta, \quad (10)$$

式中: $\rho_{\text{exp}}(\theta_i, \theta_r, \varphi)$ 为拓展所得光谱反射率; $\rho_{\text{BRF}}(\theta_i, \theta_r, \varphi)$ 为考虑太阳角度及观测角度的参考光谱反射率; η 为比值拓展系数,其计算公式为

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\rho_{\text{TD},i}(\theta_i, \theta_r, \varphi) / \rho_{\text{BRF},i}(\theta_i, \theta_r, \varphi)], \quad (11)$$

式中: n 为通道式辐射计的通道总数; $\rho_{\text{TD},i}(\theta_i, \theta_r, \varphi)$

为包含太阳角度与观测角度影响的通道式反射率; $\rho_{\text{BRF},i}(\theta_i, \theta_r, \varphi)$ 为由参考反射率卷积得到的对应通道反射率。

3 数据获取与处理

3.1 数据来源

使用数据来源于科技部“国家高分辨遥感综合定标场”(以下简称“包头场”)人工靶标区安装的通道式自动观测系统、太阳光度计CE318、自动气象站等常态化运行的自动观测设备及便携式光谱仪(SVC,HR1024I,Spectra Vista,美国)、多角度自动观测系统等移动设备。包头场位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗,坐标北纬40.85°,东经109.62°,距离包头市区约60 km^[13],如图2所示,其中通道式辐射计用于靶标辐亮度的获取,太阳光度计用于大气参数的获取。

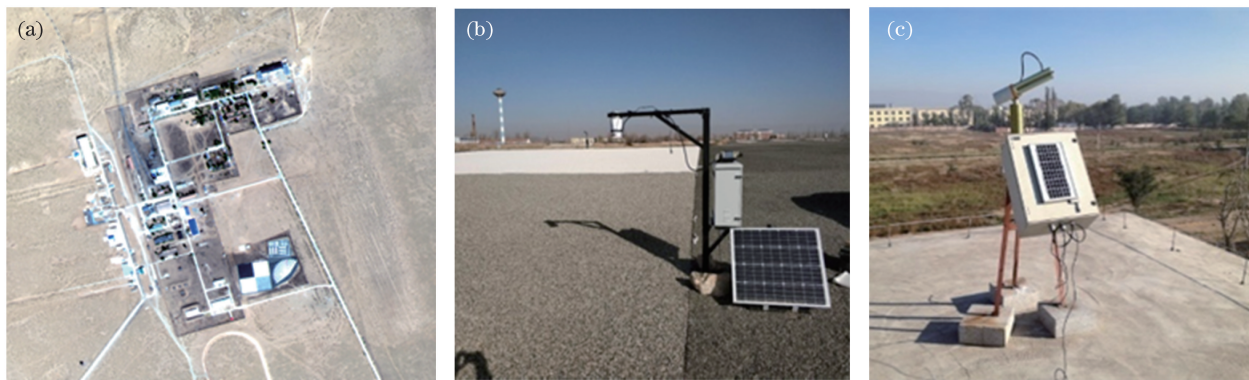


图2 包头场自动观测系统。(a)定标场人工靶标区总览;(b)通道式辐射计;(c)太阳光度计CE318

Fig. 2 Automatic observation system of the Baotou calibration site. (a) Overview of artificial targets in calibration site; (b) multispectral radiometer; (c) sunphotometer CE318

通道式辐射计有8个光谱响应通道,中心波长分别约为440,500,680,870,1014,1300,1550,1650 nm,平均半峰全宽(FWHM)约为10 nm。表1列出了通道式辐射计的通道参数,图3为光谱

表1 通道式辐射计的滤光片参数

Table 1 Filter parameters of multispectral radiometer

Channel No.	Central wavelength λ /nm	FWHM B_λ /nm	Transmission τ_λ /%
1	439.72	10.48	≥ 37
2	499.79	10.27	≥ 50
3	679.77	10.13	≥ 50
4	869.60	10.96	≥ 50
5	1015.50	9.44	≥ 40
6	1298.63	11.05	≥ 40
7	1549.25	10.87	≥ 50
8	1649.23	12.52	≥ 50

响应曲线。SVC光谱覆盖范围为339.2~2508.2 nm,间隔为1.1 nm左右不等,用于结果验证。

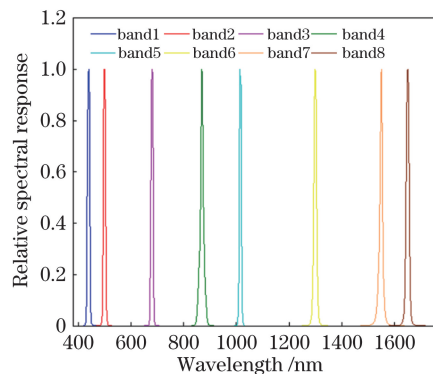


图3 通道式辐射计光谱响应函数曲线

Fig. 3 Spectral response function of multispectral radiometer

3.2 实验数据获取与处理

使用的数据包括用于计算通道式反射率的通道

式辐射计测量数据,用于光谱拓展结果验证的 SVC 同步测量数据,用于计算参考反射率的半经验 BRDF 数据,及用于模拟大气下行总辐照度的大气参数。

1) 通道式辐射计自动测量数据

通道式辐射计架设于固定灰色靶标上方,每天从 7:00 到 19:00、间隔 2 min 获取地面辐亮度数据。为保证测量数据的稳定性,选取同步观测前后 10 min 的数据进行分析,剔除异常数据后求平均值,以此作为观测时刻的辐亮度数据。

2) 大气数据

大气参数由一台自动跟踪太阳光度计 CE318 和一台自动气象仪组成的大气观测系统获取,该观测系统对包头场的大气状态实施不间断观测,数据可存储于系统内并传回北京数据处理中心^[13]。根据大气参数观测系统,可以获取场地辐射定标中需要的主要参数,如 550 nm 气溶胶光学厚度与大气柱水汽含量等。

3) 半经验 BRDF 模型数据

使用多角度观测架和野外便携式光谱仪测量得到多角度数据,每天从 10:00 到 15:00 每隔一小时测量一组多角度数据。观测天顶角范围为 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$,角度间隔为 10° ;观测方位角范围为 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$,角度

间隔为 45° 。剔除测得多角度数据中的异常数据,利用多角度反射率数据拟合 Roujean 模型中的三个系数,从而获得目标的半经验 BRDF 模型。根据测量时刻观测几何参数,利用目标半经验 BRDF 模型计算目标反射率作为参考高光谱反射率。

4) SVC 测量数据

在 2018 年 9—10 月间,利用 SVC 对灰色靶标进行人工同步测量,从 10:00 到 15:00 每隔半小时与通道式辐射计进行同步观测。同步观测包括参考板与灰色靶标,共获取 4 d 的同步数据。每次同步观测时观测天顶角为 0° ,相对方位角为 0° ,太阳天顶角在 10:00—15:00 期间最大差异约为 10° 。每个时刻连续观测 10 条 SVC 数据,剔除异常数据并进行平均处理,作为同步观测时刻的精度验证数据。

4 结果讨论与验证分析

4.1 光谱拓展结果验证

根据上文所述光谱拓展方法,结合测量时刻的观测几何计算地表反射率,并以此为参考,对通道式辐射计自动观测数据进行反射率光谱拓展。与 2018 年 9 月 21 日、9 月 23 日、10 月 29 日、10 月 30 日 4 天的 SVC 同步光谱测量数据进行对比,如图 4 所示。

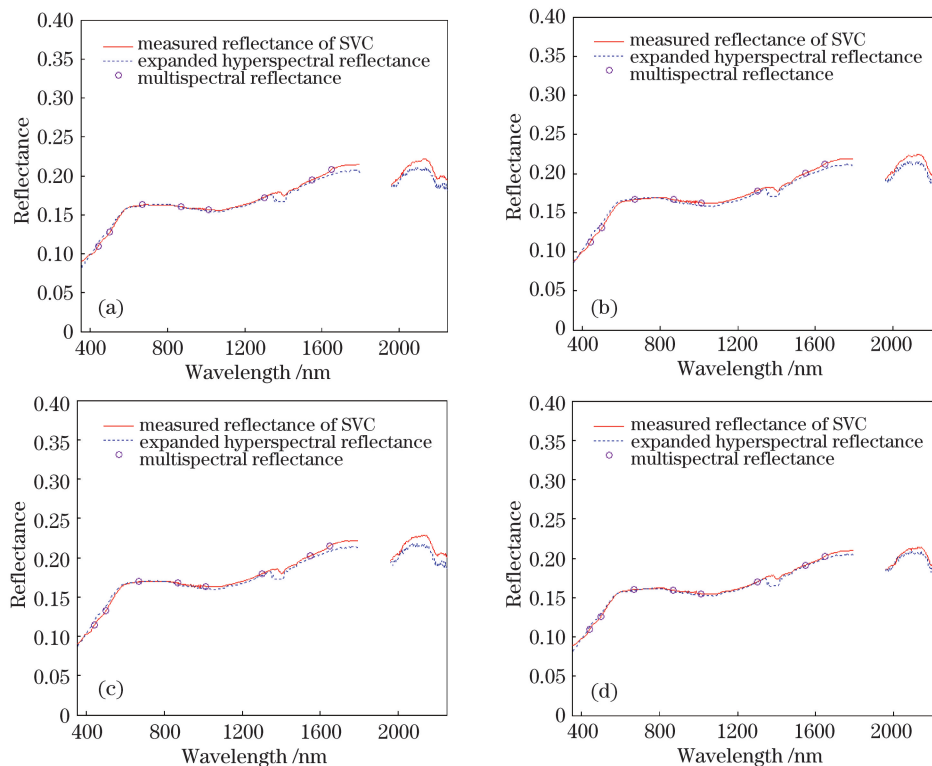


图 4 光谱拓展结果。(a) 2018-10-30T11:00; (b) 2018-10-30T12:00; (c) 2018-10-30T13:00; (d) 2018-10-30T14:00

Fig. 4 Results of hyperspectral reflectance determination. (a) 2018-10-30T11:00; (b) 2018-10-30T12:00; (c) 2018-10-30T13:00; (d) 2018-10-30T14:00

以 10 月 30 日的 4 个时刻为例(11:00、12:00、13:00、14:00),光谱拓展反射率与 SVC 实测反射率保持了较高的一致性,反射率曲线几乎完全重合,平均相对差异均值在 1% 以内,均方根误差 (RMSE) 在 0.005 以内(表 2)。(在 1800~1960 nm 波段由于 SVC 探测器重合导致数据异常,故不予考虑。)

分析所有同步实验数据,统计不同波段拓展结果与 SVC 实测值的相对差异均值及标准差,如图 5 所示,其中点为相对差异平均值,误差棒为相对差异的标准差。可以看到,在整个波谱范围内拓展光谱反射率与实际观测值的差异普遍在 5% 以内,平均相对差异为 2.67%。与不考虑 BRDF 效应(将包头场灰色靶标 SVC 历史观测反射率数据作平均处理,

表 2 光谱拓展精度示例(10 月 30 日)
Table 2 Accuracy of hyperspectral reflectance determination (October 30th)

Time	Average relative error /%	RMSE
11:00	-0.989	0.005
12:00	-0.755	0.005
13:00	-0.911	0.005
14:00	-0.889	0.003

作为不考虑 BRDF 效应的参考光谱反射率)的光谱拓展结果相比,考虑 BRDF 效应的光谱拓展结果平均相对差异降低了 1.17%,整体优于不考虑 BRDF 效应的拓展结果。

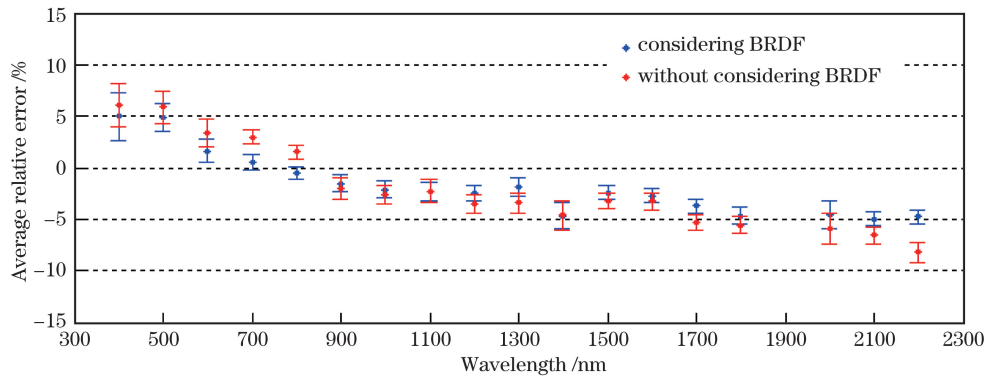


图 5 通道式辐射计测量光谱拓展结果与 SVC 实测数据差异

Fig. 5 Difference between reconstructed hyperspectral reflectance and measured reflectance of SVC

4.2 基于地面自动测量数据光谱拓展的 Sentinel 卫星定标结果对比分析

欧空局 Sentinel-2A/B 卫星分别于 2015、2017 年发射,其上搭载的高分辨多光谱载荷 (MSI) 采用星上定标的方式进行辐射定标,精度优于 5%^[14]。考虑到包头场人工靶标的尺寸限制^[15],选择 2018 年

9 月 21 日及 10 月 29 日过境的 4 个可见-近红外波段(10 m 空间分辨率)进行定标结果对比分析。图 6 所示为 Sentinel-2 过境时刻影像数据, $R_{AOT@550\text{ nm}}$ 为过境时刻 550 nm 气溶胶光学厚度, R_{wvc} 为大气柱水汽含量。图 7 所示为 Sentinel-2 通道光谱响应函数曲线。基于 3.1 节介绍的通道式辐

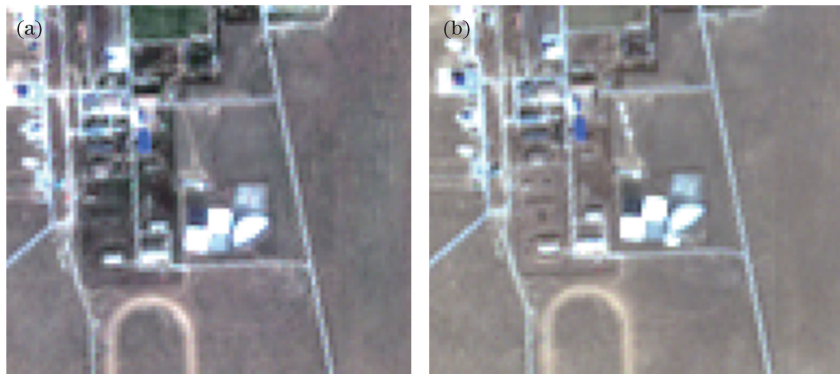


图 6 Sentinel-2 过境时刻影像数据。(a) Sentinel-2B (2018-09-21, $R_{AOT@550\text{ nm}}=0.20$, $R_{wvc}=0.39$);

(b) Sentinel-2A (2018-10-29, $R_{AOT@550\text{ nm}}=0.07$, $R_{wvc}=0.56$)

Fig. 6 Acquired Sentinel-2 images. (a) Sentinel-2B (2018-09-21, $R_{AOT@550\text{ nm}}=0.20$, $R_{wvc}=0.39$);

(b) Sentinel-2A (2018-10-29, $R_{AOT@550\text{ nm}}=0.07$, $R_{wvc}=0.56$)

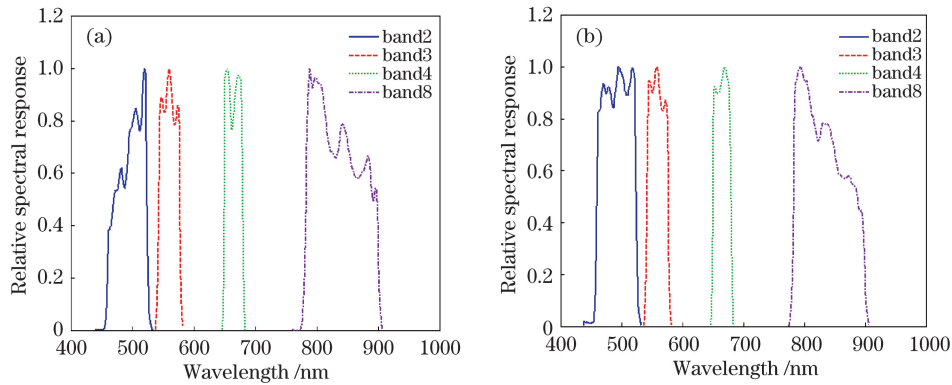


图 7 Sentinel-2 通道光谱响应函数曲线。(a) Sentinel-2A; (b) Sentinel-2B

Fig. 7 Spectral response function of Sentinel-2. (a) Sentinel-2A; (b) Sentinel-2B

射计自动测量数据进行光谱拓展, 比较卫星观测的表观辐亮度与拓展光谱反射率模拟所得入瞳辐亮度, 计算相对差异[(影像提取辐亮度 - 拓展结果模

拟入瞳辐亮度)/拓展结果模拟入瞳辐亮度], 如表 3 所示, 相对差异均在 10% 以内, 说明了拓展结果用于实际定标的有效性。

表 3 基于光谱拓展的 Sentinel-2 定标对比分析

Table 3 Comparison of onboard observed and predicted at-sensor radiance of Sentinel-2 based on the reconstructed hyperspectral reflectance

Image	Band	Observed radiance / ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)	Spectral reconstruction results			
			Simulated radiance / ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)		Relative error / %	
			Considering BRDF	Without considering BRDF	Considering BRDF	Without considering BRDF
Sentinel-2B 2018-09-21	Blue	82.51	85.17	86.03	-3.12	-4.09
	Green	78.12	77.64	78.47	0.62	-0.45
	Red	70.87	67.13	68.12	5.56	4.04
	NIR	50.95	46.66	47.06	9.19	8.27
Sentinel-2A 2018-10-29	Blue	60.52	62.18	62.94	-2.66	-3.84
	Green	56.37	56.08	56.71	0.52	-0.60
	Red	52.19	49.65	50.25	5.12	3.86
	NIR	36.89	33.55	33.83	9.94	9.05

4.3 光谱拓展方法及定标不确定度分析

光谱拓展结果的不确定度主要来源于通道式地表反射率及光谱拓展比值系数计算不确定度。通道式地表反射率由通道式辐射计观测辐亮度与辐射传输模拟获得的太阳下行总辐亮度计算得到, 不确定度具体包括: 1) 中国计量科学研究院给出的通道式辐射计标定的总体测量不确定度为 2%; 2) 气溶胶光学厚度 (AOT) 及水汽含量 (WVC) 测量误差引起的大气下行总辐射估算不确定度, 由于包头场 CE318 已加入 AERONET, 其给出的 AOT 不确定度为 5.5%, 水汽含量不确定度为 10%^[16], 利用蒙特卡罗方法推算其不确定度贡

献分别为 0.24% 和 0.09%; 3) 太阳照度模型误差约为 1.00%^[8]; 4) 由大气辐射传输模型 MODTRAN 用户手册知其模型误差为 2.00%^[17]; 5) BRDF 模型不确定度为 1.42%^[10]。

光谱拓展比值系数是 8 个通道实测反射率与参考反射率的比值均值, 其不确定度来源于两者联合求解时的拟合误差, 由 8 个通道相对误差的标准差得到。使用 10 月 29 日全天测量数据计算出系数的平均不确定度约为 0.23%。

根据误差传递理论, 计算以上不确定因素给地面光谱拓展结果带来的总不确定度为 3.34%, 计算公式为

$$U_p = \sqrt{U_{rad}^2 + U_{AOT}^2 + U_{WVC}^2 + U_{Solar}^2 + U_{MODTRAN}^2 + U_{BRDF}^2 + U_{Mod}^2}, \quad (12)$$

式中: U_{ρ} 为地面光谱拓展结果总不确定度; U_{rad}^2 , U_{AOT}^2 , U_{WVC}^2 , U_{Solar}^2 , $U_{MODTRAN}^2$, U_{BRDF}^2 , U_{Mod}^2 分别代表通道式辐射计定标不确定度, AOT 不确定度, WVC 不确定度, 太阳照度模型误差, MODTRAN 辐射传输模型误差, BRDF 模型误差以及光谱拓展比值系数误差导致的地面光谱拓展结果不确定度, 具体数值见表 4。

表 4 地面光谱拓展结果的不确定因素及其不确定度

Table 4 Uncertainty factors and uncertainty of ground spectral extension results

Influencing factor	Uncertainty / %
Calibration error of multispectral radiometer	2.00
Downward irradiance due to AOT error	0.24
Downward irradiance due to WVC error	0.09
Solar irradiance model	1.00
MODTRAN model	2.00
BRDF model	1.42
Reconstruction coefficient	0.23

基于此, 绝对辐射定标不确定源主要包括: 1) 地表反射率获取误差, 由光谱拓展结果给出其不确定度为 3.34%, 利用蒙特卡罗模拟方法推算其对星上辐亮度的不确定度贡献, 在蓝、绿、红、近红外通道分别为 2.12%, 2.57%, 2.90%, 3.09%; 2) 观测区域非均匀性, 由同期测量的观测区域反射率统计相对差异标准差计算其不确定度为 1.39%, 利用蒙特卡罗

表 5 基于光谱拓展的 Sentinel-2 卫星辐射定标验证不确定度分析

Table 5 Uncertainty analysis of Sentinel-2 radiometric calibration based on the reconstructed hyperspectral reflectance

Uncertainty contributor	Uncertainty / %	Uncertainty of simulated TOA radiance / %			
		Blue	Green	Red	NIR
Reconstructed hyperspectral reflectance of target	3.34	2.12	2.57	2.90	3.09
Surface homogeneity	1.39	0.90	1.09	1.23	1.31
Surface BRDF characteristic	1.50	0.95	1.16	1.30	1.39
AOT	5.50	0.17	0.32	0.39	0.37
WVC	10.00	0.01	0.01	0.03	0.23
MODTRAN model	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Solar irradiance model	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Overall uncertainty		3.35	3.77	4.10	4.29

5 结 论

通道式辐射计因成本低、测量稳定性高等特点, 成为当前场地自动化替代定标中较为普遍的核心装备。在实际应用中, 通道式辐射测量结果需通过光

模拟方法推算其对星上入瞳辐亮度不确定度贡献不大于 1.31%; 3) 观测区域 BRDF 特性, 分析观测天顶角变化时的地表反射率测量相对差异统计标准差可知, 在观测天顶角小于 10° 的情况下, 地表 BRDF 特性带来的不确定度约为 1.5%, 利用蒙特卡罗模拟方法推算其对星上入瞳辐亮度不确定度的贡献不大于 1.39%; 4) 大气环境不确定度, 气溶胶光学厚度测量不确定度约为 5.50%, 大气柱水汽含量不确定度约为 10.00%, 其对星上入瞳辐亮度的不确定度贡献不大于 0.39% 和 0.23%; 5) MODTRAN 大气辐射传输模型误差, 对星上入瞳辐亮度的不确定度贡献不大于 2.00%; 6) 太阳照度模型误差约 1.00%, 对星上辐亮度的不确定度贡献不大于 1.00%。

各不确定源的不确定度及其在可见光-近红外 4 个波段上对入瞳辐亮度的不确定度贡献如表 5 所示, 目标光谱拓展结果的不确定度为 3.34%, 蓝、绿、红、近红外通道的入瞳辐亮度总不确定度根据误差传递理论计算, 分别为 3.35%, 3.77%, 4.10%, 4.29%。不考虑 BRDF 效应时, 目标光谱拓展结果的不确定度为 4.14% (不引入 BRDF 模型误差, 但考虑太阳角度变化带来的 BRDF 效应, 该项由包头场历史数据统计计算得出, 为 2.83%), 蓝、绿、红、近红外通道的入瞳辐亮度总不确定度根据误差传递理论计算, 分别为 4.18%, 4.45%, 4.78%, 4.89%。考虑 BRDF 效应的自动场地辐射定标不确定度平均降低了 0.70%。

谱拓展获得场地连续光谱反射率, 从而保证光谱特性、观测角度不同的多卫星载荷辐射定标结果的一致性与可比性。如何降低光谱拓展过程引入的不确定性, 成为提高场地自动化替代定标精度的关键问题。引入场地观测目标 BRDF 模型获取与通道式

反射率观测几何一致的双向参考反射率,并与通道式反射率一起实现连续光谱反射率计算,在理论上更加完备。将拓展结果与野外便携式光谱仪实测光谱反射率进行比对和验证,定量分析了各项不确定因素引起的光谱拓展的不确定性,光谱拓展结果的总体不确定度为 3.34%,与使用光谱辐射计测量的目标反射率不确定度基本在一个量级。将该光谱拓展方法应用于 Sentinel-2A/B 卫星定标结果进行对比分析,可得各通道相对差异均在 10% 以内,基于光谱拓展结果的入瞳辐亮度模拟不确定度在蓝、绿、红、近红外通道分别为 3.35%, 3.77%, 4.10%, 4.29%。

该项研究工作是进一步提升场地自动化替代定标精度的有益探索。不足之处在于等效参考反射率计算时依赖于目标连续光谱反射率实测结果和目标 BRDF 模型先验知识,样本数据量及目标特性的时间变化也会对拓展结果有一定影响。后续考虑在不同场景、不同季节获取更多的先验数据进行模型优化及分析验证,探求更加稳定精确的模型,提高自动化场地辐射定标的精度,这对于场地自动化替代定标的发展有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Lü 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.
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.
- [2] Zhang M, Wei W, Zhang Y N, *et al.* On-orbit automated calibration of Hyperion hyperspectral remote sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0528002.
张孟, 韦玮, 张艳娜, 等. Hyperion 高光谱遥感器的在轨自动化定标[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0528002.
- [3] Czaplá-Myers J S, Bouvet M, Wenny B. The radiometric calibration network (RadCalNet): a global calibration and validation test site network[C]// *Agu Fall Meeting*, December 12-16, 2016, San Francisco. Washington, D. C. : AGU, 2016: B31B-0461.
- [4] Anderson N, Czaplá-Myers J, Leisso N, *et al.* Design and calibration of field deployable ground-viewing radiometers[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(2): 231-240.
- [5] Czaplá-Myers J. Automated ground-based methodology in support of vicarious calibration[D]. Arizona: The University of Arizona, 2006: 2-27.
- [6] Czaplá-Myers J S, Thome K J, Cocilovo B R, *et al.* Temporal, spectral, and spatial study of the automated vicarious calibration test site at Railroad Valley, Nevada[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7081: 70810L.
- [7] Yin Y P, Li X, Zheng X B, *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.
- [8] Czaplá-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.
- [9] Li X, Yin Y P, Liu E C, *et al.* Automated test-site radiometer for vicarious calibration[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9264: 92640V.
- [10] Zhao Y G. Study on key elements matching and transforming methods for remote sensing data[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 5-32.
赵永光. 遥感观测数据要素匹配与转换方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 5-32.
- [11] Liang S L, Li X W, Wang J D, *et al.* Quantitative remote sensing: ideas and algorithms[M]. Beijing: Science Press, 2013: 2-17.
梁顺林, 李小文, 王锦地. 等. 定量遥感: 理念与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 2-17.
- [12] Roujean J L, Leroy M, Deschamps P Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1992, 97(D18): 20455-20468.
- [13] Pang B, Ma L L, Liu Y K, *et al.* Ground-based automatic radiometric calibration of land observation satellite optical sensors and cross validation analysis[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(1): 146-154.
庞博, 马灵玲, 刘耀开, 等. 陆地卫星光学载荷地基自动辐射定标与验证分析[J]. *遥感技术与应用*, 2019, 34(1): 146-154.
- [14] Technical guides in calibration and validation of Sentinel-2 MSI, ESA[OL]. [2019-01-05]. <https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/cal-val>.
- [15] Ma L L, Zhao Y G, Woolliams E R, *et al.*

- Uncertainty analysis of the automated radiometric calibration over Baotou calibration and validation site in China[C]//RAQRS 2017-Recent Advance in Quantitative Remote Sensing. [S. l. : s. n.], 2017: n1-n6.
- [16] Sinyuk A, Holben B N, Smirnov A, *et al.* Assessment of error in aerosol optical depth measured by AERONET due to aerosol forward scattering[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(23): L23806.
- [17] Wright J C. Accuracy of LOWTRAN 7 and MODTRAN in the 2.0-5.5 μm region[J]. Applied Optics, 1994, 33(9): 1755-1759.