

基于 HY-1C SCS 太阳漫反射板的星上绝对辐射定标与验证

许和鱼^{1,2*}, 张黎明¹, 黄文薪¹, 李鑫¹, 司孝龙¹, 徐伟伟¹, 宋庆君³

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 230026;

³国家卫星海洋应用中心, 北京 100081

摘要 建立了基于星上定标光谱仪(SCS)太阳漫反射板的绝对辐射定标模型。通过对 2018 年 12 月 12 日星上漫反射板定标数据进行处理,得到 SCS 绝对辐射定标系数。以 TERRA MODIS 为参考载荷,对 SCS 辐射定标系数进行三次交叉验证。为了提高光谱匹配精度,消除光谱设置的差异,对 SCS 各通道实测等效辐亮度进行插值迭代,得到光谱辐亮度,并将该结果与 TERRA MODIS 光谱响应函数进行积分,得到预测等效辐亮度。通过比较发现,MODIS 各通道预测与实测等效辐亮度具有非常好的一致性,相对偏差均值最大为 2.78%,表明 SCS 辐射定标系数真实可靠,具有较高的定标精度。同时也验证了双向反射分布函数(BRDF)、透过率等参数具有较高的测试精度。

关键词 遥感; 星上定标光谱仪; 太阳漫反射板; 辐射定标; 验证

中图分类号 TP79; TP722.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0928002

On-Board Absolute Radiometric Calibration and Validation Based on Solar Diffuser of HY-1C SCS

Xu Heyu^{1,2*}, Zhang Liming¹, Huang Wenxin¹, Li Xin¹,
Si Xiaolong¹, Xu Weiwei¹, Song Qingjun³

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

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China

Abstract Based on the solar diffuser of the satellite calibration spectrometer (SCS), we establish an absolute radiometric calibration model. We can obtain the absolute radiometric calibration coefficient of SCS by processing the on-board diffuser calibration data obtained on December 12, 2018. The radiometric calibration coefficient of SCS is cross-validated thrice using TERRA MODIS, which is used as the reference load. In order to improve the accuracy of spectral matching and to eliminate the difference in spectra setting, the measured equivalent radiance of SCS is interpolated to obtain the spectral radiance, and subsequently the obtained results are integrated with the spectral response function of TERRA MODIS to obtain the predicted equivalent radiance. The comparison results show that the predicted equivalent radiance of each band of MODIS is in consistency with the measured equivalent radiance and the maximum relative deviation is 2.78%, which indicates that the SCS radiometric calibration coefficient is reliable and has a high calibration accuracy. It is verified that the parameters such as bidirectional reflection distribution function (BRDF) and transmittance have relatively high test precision.

Key words remote sensing; satellite calibration spectrometer; solar diffuser; radiometric calibration; validation

OCIS codes 280.4788; 110.4234; 150.1488

收稿日期: 2019-11-27; 修回日期: 2019-12-24; 录用日期: 2020-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(41601388)

* E-mail: 1144152179@qq.com

1 引 言

随着全球气温升高,海平面上升等自然现象频繁发生,世界各国相继开展了大规模的地球观测计划,对遥感数据精度和定量化应用水平提出越来越高的要求。辐射定标是卫星遥感数据定量化应用过程中一个必不可少的重要环节,其目的是为了建立遥感器输入物理量与输出数值之间的定量转换关系^[1-3]。发射前卫星载荷虽然经过严格且高精度的实验室定标,然而在发射过程中和在轨运行期间,受机械振动和各种空间辐射等因素影响,其光学性能、机械结构及探测器增益和偏置会发生不同程度的变化。为了保证卫星寿命期内对地遥感观测数据的可靠性和定量化应用水平,需要对遥感器进行星上绝对辐射定标^[4-7]。

当前,遥感卫星在轨定标的主要方法有替代定标法、交叉定标法及基于星载定标器的星上定标法^[8-11]。其中替代定标法和交叉定标法受天气、场地环境、空间分辨率及光谱差异等因素限制,定标周期较长,定标精度受限。而星上定标法是一种为满足遥感器器的实际应用需求而发展起来的独立定标方法,具有高频次、高效率、高精度等优点^[12]。星上定标系统主要经历了基于标准灯的部分孔径部分光路定标、基于标准灯和积分球的全孔径部分光路定标、基于太阳漫反射板的全孔径全光路定标三个发展阶段^[13-17],其中基于太阳漫反射板的定标方法是目前最具发展潜力、定标精度水平最高的方法。美国 Terra/Aqua 卫星上搭载的两台中分辨率成像光谱仪(MODIS)和欧洲航空局(ESA)ENVIST 上搭载的中分辨率成像光谱仪(MERIS)均采用了“太阳+太阳漫反射板”的星上定标系统。多年定标结果表明,这种定标方式可实现全光路、全视场、全孔径、不确定度优于 2% 的反射率定标及不确定度优于 5% 的绝对辐射定标^[18-24]。

HY-1C 作为 HY-1B 卫星的后续星,于 2018 年 9 月 7 日在太原卫星发射中心成功发射,其主要功能是对全球大洋、近海岸水体进行高精度、大范围探测。作为太阳同步轨道卫星, HY-1C 轨道高度为 782 km,降交点地方时为上午 10:00—11:00,其平台共搭载五颗载荷,分别是海洋水色水温扫描仪、海岸带成像仪、紫外成像仪、星上定标光谱仪及船舶自动识别系统。其中星上定标光谱仪(SCS)作为星上辐射定标基准源对同平台 COCTS(Chinese ocean color and temperature scanner)、CZI(coastal zone

imager)及 UVI(ultraviolet imager)进行交叉辐射定标^[25-26],需要具备高精度的光谱定标和辐射定标能力,因此为其设计了“双太阳漫反射板+波长板”星上定标系统。本文针对该星上定标系统,阐述了基于太阳漫反射板的星上辐射定标原理,并根据实验测试结果建立星上辐射定标模型;通过对星上定标数据进行处理,得到各通道辐射定标系数;将辐射定标精度较高的 TERRA MODIS 作为参考载荷,对 SCS 星上定标系数进行交叉检验,并对验证结果进行分析与总结。

2 辐射定标原理

HY-1C 上搭载的 SCS 采用 CCD 探测器,该探测器的星下点空间分辨率为 1.1 km,通过指向机构能够对星下点 $-30^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内的任一角度侧摆成像,SCS 主体结构如图 1 所示^[25]。SCS 可见至近红外波段部分通道动态范围和信噪比(SNR)指标如表 1 所示。

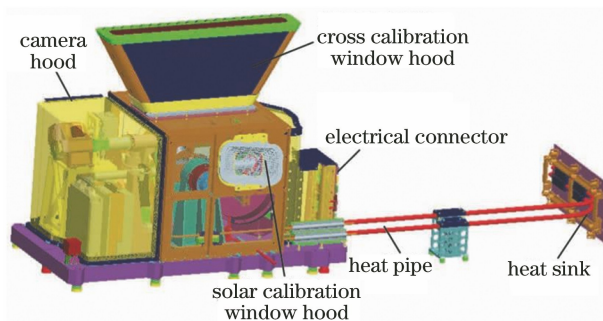


图 1 SCS 的结构示意图^[25]

Fig. 1 Structural diagram of SCS^[25]

表 1 SCS 动态范围和 SNR 指标

Table 1 Dynamic range of SCS and SNR

| Wavelength / nm | Typical spectral radiance / (mW · cm ⁻² · μm ⁻¹ · sr ⁻¹) | SNR |
|--------------------|---|------|
| 412 | 9.10 | 800 |
| 443 | 8.41 | 950 |
| 490 | 6.56 | 1000 |
| 520 | 5.46 | 1000 |
| 565 | 4.57 | 950 |
| 670 | 2.46 | 800 |
| 750 | 1.61 | 750 |
| 865 | 1.09 | 950 |

SCS 星上定标系统示意图如图 2 所示,包含定标漫反射板、参考漫反射板、波长定标板、“空板”、太阳衰减屏及转轮。其中太阳衰减屏的作用是衰减照明漫反射板的太阳光能量;定标漫反射板对 SCS 辐

射定标,使用频率较高,其表面双向反射分布函数(BRDF)会随漫反射板累积曝光时间的增加而发生衰减;参考漫反射板与定标漫反射板采用相同的材料和加工工艺,具有近乎相同的光学性能,参考漫反射板使用频率较低,作为参考标准,用于长期监测和修正定标漫反射板的太阳光能量衰减;波长定标板的作用是对 SCS 进行光谱定标;SCS 每次定标,需要通过观测“空板”实现各通道暗电流采集。通过转轮依次将定标漫反射板、参考漫反射板、波长定标板、“空板”旋转到 SCS 前端,分别实现辐射定标、衰减监测、光谱定标及暗电流采集。星上定标一般在卫星入光之后,星下点入光之前进行。SCS 星上定标计划为定标漫反射板每天使用 1 次,参考漫反射板每月使用一次,波长定标板每月使用 1 次,即 SCS 辐射定标频率为每天 1 次,衰减监测和光谱定标频率为每月 1 次。

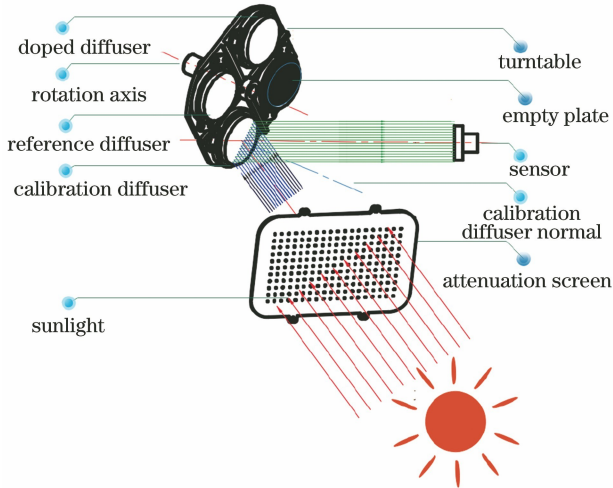


图 2 星上定标系统示意图

Fig. 2 Schematic of on-board calibration system

SCS 采用的是硅探测器。该探测器具有良好的线性响应^[27],其辐射响应模型为

$$L_{on}^b = r^b \times (D_{on}^b - D_0^b), \quad (1)$$

式中: D_{on}^b 表示 SCS b 波段漫反射板的响应值; D_0^b 表示 b 波段暗电流响应值; r^b 表示 b 波段辐射定标系数; L_{on}^b 表示定标时刻漫反射板的出射辐亮度。

定标时刻,太阳照明 BRDF 已知的定标漫反射板,出射辐亮度可以表示为

$$L_{on}^b = \frac{E^{\text{sun}} \cos(\theta_i^{\text{sun}}) \tau(\theta_i^{\text{sa}}, \varphi_i^{\text{sa}}) f^b(\theta_i^{\text{sun}}, \varphi_i^{\text{sun}}; \theta_i^{\text{view}}, \varphi_i^{\text{view}}; \lambda)}{d^2}, \quad (2)$$

式中: E^{sun} 表示大气外太阳常数; t 表示定标时刻;

$\theta_i^{\text{sa}}, \varphi_i^{\text{sa}}$ 分别表示太阳照明衰减屏的天顶角、方位角; $\theta_i^{\text{view}}, \varphi_i^{\text{view}}$ 分别表示 SCS 观测漫反射板的天顶角和方位角; $\theta_i^{\text{sun}}, \varphi_i^{\text{sun}}$ 分别表示太阳照明漫反射板的天顶角和方位角; $f^b(\theta_i^{\text{sun}}, \varphi_i^{\text{sun}}; \theta_i^{\text{view}}, \varphi_i^{\text{view}}; \lambda)$ 表示漫反射板的 BRDF; $\tau(\theta_i^{\text{sa}}, \varphi_i^{\text{sa}})$ 表示太阳衰减屏透过率; d 表示日地距离因子; λ 表示 b 通道中心波长。

定标时刻漫反射板 BRDF 与实验室测量 BRDF 关系为

$$f^b(\theta_i^{\text{sun}}, \varphi_i^{\text{sun}}; \theta_i^{\text{view}}, \varphi_i^{\text{view}}; \lambda) = H(\lambda; t) f_{\text{lab}}^b(\theta_i^{\text{sun}}, \varphi_i^{\text{sun}}; \theta_i^{\text{view}}, \varphi_i^{\text{view}}; \lambda), \quad (3)$$

式中: $H(\lambda; t)$ 表示定标时刻波长 λ 处漫反射板 BRDF 的衰减系数,通过载荷按顺序观测定标板和参考板得到; $f_{\text{lab}}^b(\theta_i^{\text{sun}}, \varphi_i^{\text{sun}}; \theta_i^{\text{view}}, \varphi_i^{\text{view}}; \lambda)$ 表示波长 λ 处漫反射板的 BRDF 实验室测量值。

发射前根据星上定标时段太阳照明及载荷观测几何角度范围,分别测试了漫反射板 BRDF 分布特性和衰减屏透过率。光谱仪视场内漫反射板 BRDF 在波长为 565 nm 处的分布特性如图 3(a)所示,在测试角度范围内其变化范围为 0.321~0.331,具有较好的朗伯性。衰减屏透过率如图 3(b)所示,可以看出,在太阳照明角度范围内,透过率变化范围为 12.9%~13.3%,不同入射角度下衰减屏透过率具有较好的一致性。

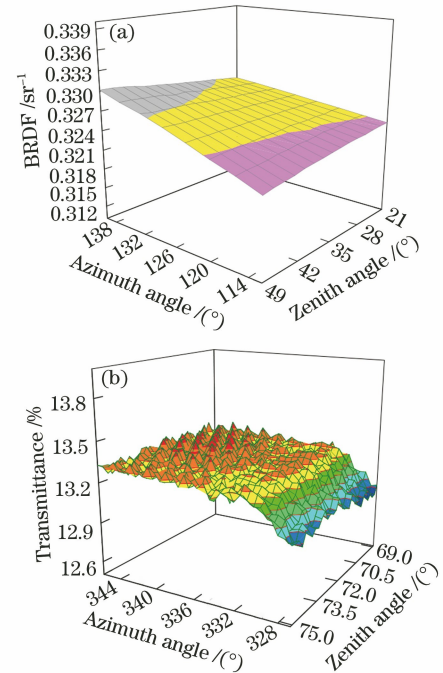


图 3 实验室测量结果。(a)BRDF 分布特性;(b)衰减屏透过率

Fig. 3 Measurement results from laboratory. (a) Distribution characteristic of BRDF; (b) transmittance of attenuation screen

选取 2018 年 12 月 12 日星上定标数据,定标时刻太阳照明漫反射板的天顶角变化范围为 $33.3637^{\circ} \sim 33.8974^{\circ}$,方位角范围为 $127.828^{\circ} \sim 126.233^{\circ}$ 。根据发射前测量得到的漫反射板 BRDF、衰减屏透过率及定标时的观测角度和照明角度,结合(1)和(2)式就可以得到 SCS 各通道定标系数。

结合对地观测影像 D_{target}^b ,可得到地物目标辐亮度为

$$L_{target}^b = r^b \times (D_{target}^b - D_0^b) \quad (4)$$

3 交叉验证

3.1 交叉验证原理

以绝对辐射定标精度较高的 TERRA MODIS 作为参考传感器,根据 SCS 通道光谱设置,选用可见及近红外 12 个通道 Level 0 级遥感影像产品对 SCS 进行交叉验证,MODIS 各通道光谱响应曲线如图 4 所示。

两颗载荷交叉成像时,观测角度、太阳照明角度、大气的稳定性、地物目标均匀性、BRDF 特性、图像匹配误差及作为参考传感器的 MODIS 载荷本身的辐射定标精度等因素决定了交叉验证精度。对交叉条件的严格选择(选择朗伯性好的地表、过境时间间隔尽可能短、同为垂直观测等)降低了成像几何差异、地物目标均匀性、BRDF 及大气稳定性带来的误差。对两颗载荷影像进行空间重采样和几何校正,利用经纬度坐标进行像元匹配来降低或者消除图像

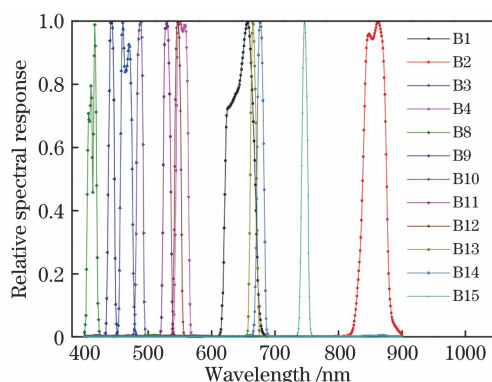


图 4 MODIS 光谱响应函数

Fig. 4 Spectral response function of MODIS

匹配误差,因此影响交叉验证精度的主要因素来自于参考传感器 MODIS 的辐射定标精度和两颗载荷的光谱差异。对辐射定标精度已经确定的 MODIS 载荷,为了提高交叉验证精度,需要对 SCS 各通道实测等效辐亮度进行插值迭代,得到连续光谱辐亮度,进而将光谱差异带来的误差降到最小,从而提高了验证精度^[3,28-29]。交叉验证流程如图 5 所示,首先利用影像经纬度信息对原始影像进行几何校正;然后通过空间重采样方式把 MODIS 影像空间分辨率降到 1.1 km,与 SCS 一致;根据各像素点经纬度信息将两颗载荷进行像元匹配,得到公共交叉区域;然后找到交叉区域中最均匀的区域,对选定区域的数字计数值(DN)均值进行统计,结合各自辐射定标系数,分别得到两颗载荷各自入瞳处实测的等效辐

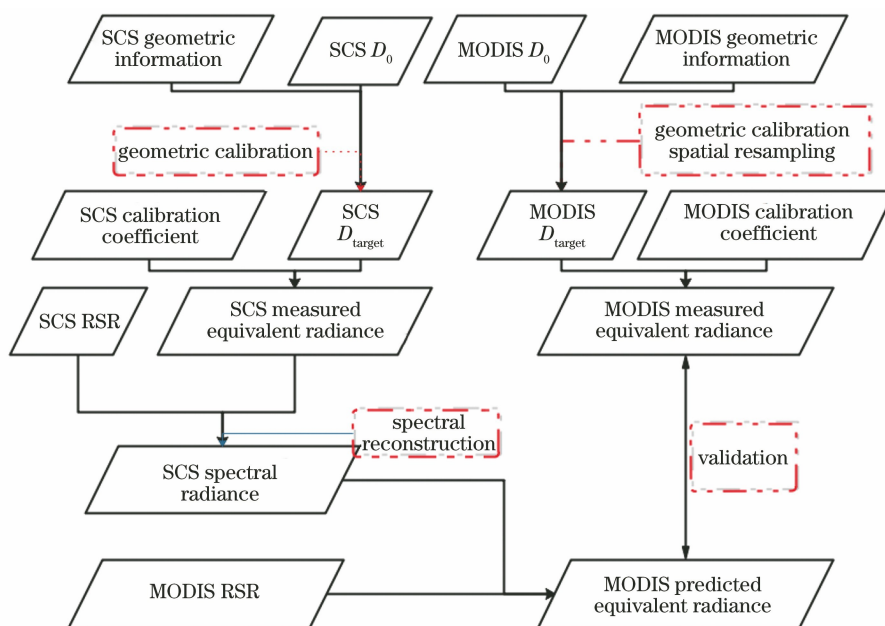


图 5 交叉验证流程图

Fig. 5 Flow chart of cross-validation

亮度;对 SCS 各通道等效辐亮度进行光谱重构,得到 SCS 入瞳处的连续光谱辐亮度;对 MODIS 各通道相对光谱响应(RSR)与 SCS 连续光谱辐亮度进行积分,得到预测的等效辐亮度,并将结果与 MODIS 实测等效辐亮度进行比较,最终完成 SCS 辐射定标系数验证。

3.2 数据处理

SCS 空间分辨率为 1.1 km, TERRA MODIS B1、B2 通道空间分辨率为 0.25 km, B3、B4 通道空间分辨率为 0.5 km, B8~B15 通道空间分辨率为

1 km。为了减小影像几何匹配误差给验证结果带来的不确定性,需要选择大面积均匀场景目标进行交叉验证。选择 2019 年 1 月 24 号 MODIS 影像数据,用以验证 SCS 辐射定标系数的可靠性,图 6(a)是经过几何校正后的 MODIS 影像,图 6(c)是经过几何校正后的 SCS 影像,图 6(b)是根据图 6(c)经纬度范围确定的具有公共区域的 MODIS 影像,其中双实线之间区域是图 6(a)与图 6(c)交叉重叠的区域。

TERRA MODIS 和 HY-1C SCS 过境时间、太阳照明位置及观测角度如表 2 所示。

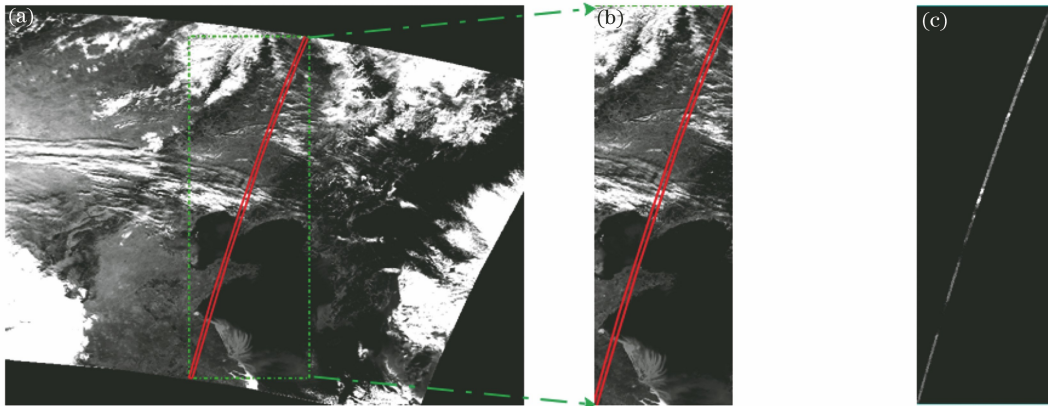


图 6 影像。(a)几何校正后的 MODIS 影像;(b)含有 MODIS 与 SCS 重叠区域的影像;(c)几何校正后的 SCS 影像

Fig. 6 Images. (a) Geometrically corrected MODIS image; (b) image of crossover region in MODIS and SCS; (c) geometrically corrected SCS image

表 2 TERRA MODIS 和 HY-1C SCS 的过境时间和几何参数

Table 2 Overpass time and geometric parameters of TERRA MODIS and HY-1C SCS

| Sensor | Overpass | | Latitude | Longitude | Sensor | | Solar | |
|--------|------------|----------|-----------|------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| | Date | Time | | | Zenith / (°) | Azimuth / (°) | Zenith / (°) | Azimuth / (°) |
| MODIS | 2019-01-24 | 10:53:08 | 35.1856°N | 120.1132°E | 1.4788 | -87.9386 | 57.4255 | 158.1702 |
| SCS | 2019-01-24 | 10:48:18 | 35.1851°N | 120.1149°E | 0.2168 | 288.6747 | 57.8052 | 157.1248 |

从表 2 可以看出,两颗载荷过境时间相差不到 5 min,且照明位置及观测天顶角和方位角很接近,最大程度降低了太阳照明角度差异、大气不稳定性及地表 BRDF 特性等因素给验证结果带来的不利影响。

两颗载荷的空间分辨率不一致,为提高验证精度,需要对 MODIS 影像进行三次卷积重采样直至空间分辨率为 1.1 km,与 SCS 保持一致。图 7(a)为重采样后的 MODIS 影像。为了提高辐射定标系数的验证精度,首先通过循环查找得到 SCS 公共交叉区域中最均匀场景 I_{SCS}^{UNI} , I_{SCS}^{UNI} 像素尺寸为 11×60 , 面积大小为 $12.1 \text{ km} \times 66 \text{ km}$, 经纬度范围是 $119.9650^\circ\text{E} \sim 120.2484^\circ\text{E}$, $34.8610^\circ\text{N} \sim 35.4515^\circ\text{N}$ 。

然后利用经纬度坐标信息,得到图 6(b)中每个像素点与 I_{SCS}^{UNI} 所有像素点之间的距离,表达式为

$$T = \begin{bmatrix} (M_{i,j}^{scs} - M_{1,1}^{mod})^2 & \cdots & (M_{i,j}^{scs} - M_{1,n}^{mod})^2 \\ \vdots & & \vdots \\ (M_{i,j}^{scs} - M_{m,1}^{mod})^2 & \cdots & (M_{i,j}^{scs} - M_{m,n}^{mod})^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (N_{i,j}^{scs} - N_{1,1}^{mod})^2 & \cdots & (N_{i,j}^{scs} - N_{1,n}^{mod})^2 \\ \vdots & & \vdots \\ (N_{i,j}^{scs} - N_{m,1}^{mod})^2 & \cdots & (N_{i,j}^{scs} - N_{m,n}^{mod})^2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: $M_{i,j}^{scs}$ 和 $N_{i,j}^{scs}$ 分别表示 I_{SCS}^{UNI} 中第 i 行、第 j 列像素点的经纬度坐标值,其中 i 取值范围为 $1 \sim 60$, j 取值范围为 $1 \sim 11$; $M_{m,n}^{mod}$ 和 $N_{m,n}^{mod}$ 分别表示 MODIS 影像第 m 行、第 n 列像素点的经纬度坐标值。可以按照下述步骤获取 MODIS 用于交叉验

证的均匀区域;1)根据 T 矩阵中最小矩阵元对应的行列号 (m, n) , 在图 6(b) 的 MODIS 影像中查找对应行列号的像素点 DN 均值;2) I_{SCS}^{UNI} 每个像素点

对应一个 T 矩阵, 重复步骤 1) 可以得到与 I_{SCS}^{UNI} 对应的 MODIS 均匀区域。两颗载荷的均匀交叉区域如图 7(b) 所示。

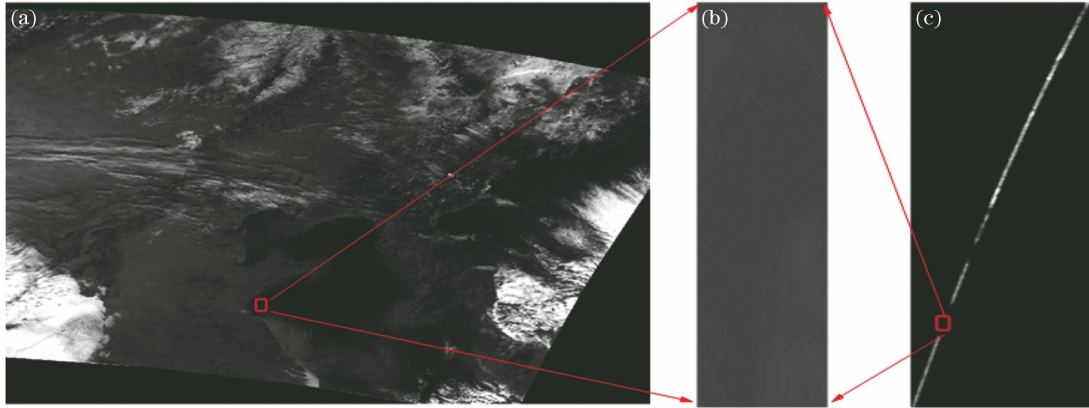


图 7 影像。(a)重采样后的 MODIS 影像;(b) MODIS 与 SCS 中的均匀交叉区域;(c)几何校正后的 SCS 影像
Fig. 7 Images. (a) Resampled MODIS image; (b) uniform crossover region in MODIS and SCS;
(c) geometrically corrected SCS image

4 结果与讨论

4.1 交叉验证结果与讨论

将交叉区域影像 DN 均值结合辐射定标系数, 按照(4)式可以分别得到 SCS 与 MODIS 各通道实测等效辐亮度, 图 8(a) 中虚线表示 SCS 各通道实测等效辐亮度, 对 SCS 各通道等效辐亮度进行插值迭代处理, 可以得到波长间隔为 1 nm 的 SCS 入瞳处光谱辐亮度, 如图 8(a) 实线所示。对 MODIS 各通道光谱响应函数 $R^{mod,b}(\lambda)$ 与重构得到的 SCS 入瞳处连续光谱辐亮度 $L^{scs}(\lambda)$ 进行卷积处理, 可以得到 MODIS 相应通道预测的等效辐亮度 $L_{pre}^{mod,b}$, 表达式为

$$L_{pre}^{mod,b} = \frac{\int R^{mod,b}(\lambda) L^{scs}(\lambda) d\lambda}{\int R^{mod,b}(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

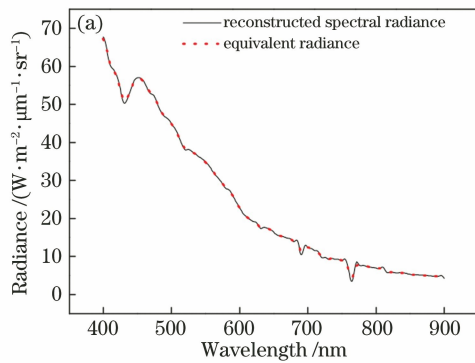


图 8(b) 中横、纵坐标分别代表 MODIS 基于影像 DN 均值得到的实测等效辐亮度、基于 MODIS 各通道光谱响应函数和插值迭代得到的 SCS 光谱辐亮度的卷积获得的预测等效辐亮度, 可以看出两组辐亮度数据具有非常好的一致性, 表明 SCS 星上定标系数具有较高的精度。

两颗载荷在 2019 年 2 月 28 日和 2019 年 3 月 13 日也存在交叉验证的机会, 交叉区域经纬度信息、过境时间及几何条件如表 3 所示, 可以看出交叉成像时间相差不到 2 min, 可以认为两颗载荷成像时大气条件稳定。

采用同样的处理方法对 2019 年 2 月 28 日和 2019 年 3 月 13 日两天交叉数据进行处理, MODIS 各通道实测与预测等效辐亮度之间关系如图 9 所示, 可以看出这两天数据具有非常好的一致性。

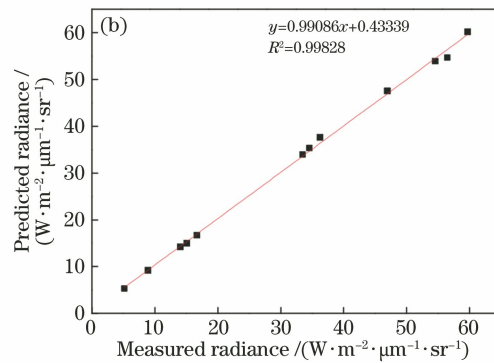


图 8 数据处理结果。(a) SCS 辐亮度;(b) 2019-01-24 交叉验证结果

Fig. 8 Data processing results. (a) Radiance of SCS; (b) cross-validation result on 2019-01-24

表 3 TERRA MODIS 和 HY-1C SCS 的过境时间及几何参数

Table 3 Overpass time and geometric parameters of TERRA MODIS and HY-1C SCS

| Sensor | Overpass | | Latitude | Longitude | Sensor | | Solar | |
|--------|------------|----------|-----------|------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| | Date | Time | | | Zenith / (°) | Azimuth / (°) | Zenith / (°) | Azimuth / (°) |
| MODIS | 2019-02-28 | 11:28:56 | 17.9005°N | 107.3940°E | 4.3040 | 100.3738 | 34.7500 | 136.5062 |
| SCS | 2019-02-28 | 11:27:52 | 17.9006°N | 107.3940°E | 0.2432 | 188.8683 | 34.9271 | 136.1380 |
| MODIS | 2019-03-13 | 11:56:48 | 17.3749°N | 90.5785°E | 1.2363 | 106.5902 | 30.0571 | 130.6945 |
| SCS | 2019-03-13 | 11:55:02 | 17.3750°N | 90.5785°E | 0.2434 | 188.9499 | 30.4301 | 129.9876 |

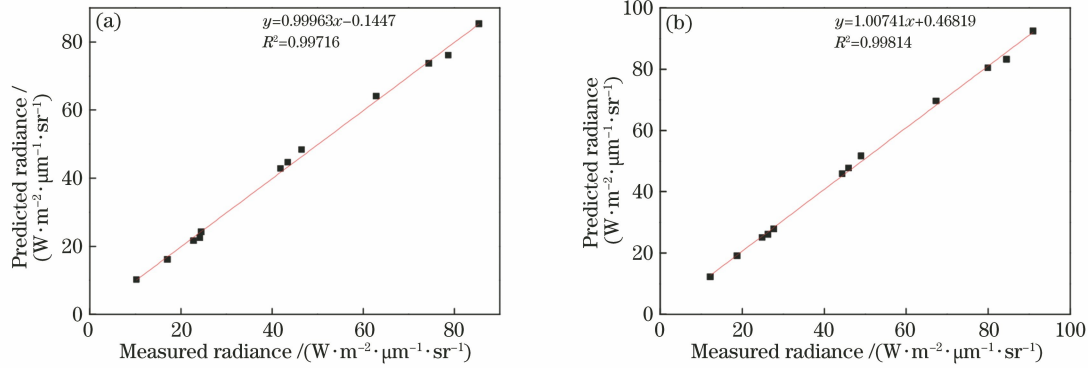


图 9 MODIS 实测等效辐亮度和预测等效辐亮度。(a) 2019-02-28;(b) 2019-03-13

Fig. 9 Predicted equivalent radiance and measured equivalent radiance obtained of MODIS.

(a) 2019-02-28; (b) 2019-03-13

MODIS 各通道实测辐亮度和预测辐亮度之间的相对偏差可以表示为

$$\epsilon_b = \frac{|L_{pre}^{mod,b} - L_{mes}^{mod,b}|}{L_{pre}^{mod,b}} \times 100, \quad (7)$$

式中： $L_{pre}^{mod,b}$ 表示 MODIS b 通道的预测等效辐亮度； $L_{mes}^{mod,b}$ 表示 MODIS b 通道的实测等效辐亮度。表 4 列出了三次交叉验证的相对偏差，可以看出每次交叉验证的相对偏差都比较小，相对偏差均值最大为 2.78%，表明三次验证结果具有较好的一致性。其中，2019 年 1 月 24 日和 2019 年 3 月 13 日交叉验证结果中的 B11 通道偏差最大，分别为 3.64% 和 5.47%；2019 年 2 月 28 日交叉验证结果中的 B14 通道偏差最大，为 6.79%。但从三次交叉验证整体结果来看，平均相对偏差小于 3%，最小相对偏差为 0.04%，这表明 SCS 星上太阳漫反射板定标系统可以对 SCS 进行真实有效的绝对辐射定标。

经分析，MODIS 各通道预测等效辐亮度与实测等效辐亮度之间存在偏差的原因主要如下。

1) 虽然两颗载荷的交叉条件经过了严格筛选，但是交叉验证时刻载荷观测位置及太阳照明角度并不完全一致，大气及辐射传输路径会存在差异，而且遥感影像空间匹配误差并不能通过空间重采样、几

表 4 实测及预测等效辐亮度之间的相对偏差

Table 4 Relative deviation between measured equivalent radiance and predicted equivalent radiance

| Band | Center wavelength / nm | Relative deviation / % | | |
|--------------------|---------------------------|------------------------|------------|------------|
| | | 2019-01-24 | 2019-02-28 | 2019-03-13 |
| B8 | 412.50 | 0.81 | 0.11 | 1.68 |
| B9 | 443.00 | 3.24 | 3.22 | 1.47 |
| B3 | 469.00 | 1.21 | 0.96 | 0.67 |
| B10 | 488.00 | 1.35 | 1.94 | 3.52 |
| B11 | 531.00 | 3.64 | 4.10 | 5.47 |
| B12 | 551.00 | 2.21 | 2.74 | 3.88 |
| B4 | 555.00 | 1.44 | 2.32 | 3.27 |
| B1 | 645.00 | 0.18 | 0.88 | 0.69 |
| B14 | 667.00 | 0.86 | 6.79 | 0.54 |
| B15 | 678.00 | 0.94 | 4.96 | 1.18 |
| B17 | 748.00 | 3.30 | 5.24 | 1.81 |
| B2 | 858.50 | 2.75 | 0.04 | 0.57 |
| Statistical result | Max | 3.64 | 6.79 | 5.47 |
| | Min | 0.18 | 0.04 | 0.54 |
| | Average | 1.83 | 2.78 | 2.06 |

何校正及像元匹配等过程得到完全消除。以上都会给交叉验证结果增加不确定度因素,大面积伪不变场具有优异的均匀性和反射率特性及稳定的大气特性,可以作为交叉验证成像的靶区,从而降低乃至消除成像几何、空间匹配给验证结果带来的偏差。

2) 利用高斯函数模型并结合实验测量得到的SCS各通道中心波长和带宽,模拟光谱响应函数,为进一步提高验证精度,需要采取正弦函数、矩形函数、 $\sin x^2$ 等对光谱响应函数进行模拟,并通过比较选择最佳拟合函数模型。

3) 由(1)、(2)式可以看出,定标时刻、定标漫反射板 BRDF 是影响 SCS 绝对辐射定标精度的一个关键因素。到 2019 年 10 月,采用参考漫反射板对定标漫反射板总共进行了 7 次衰减监测,得到了定标漫反射板 BRDF 衰减因子,部分通道衰减监测结果如图 10 所示。可以看出,衰减因子变化范围为 0.997~1.003,考虑到 BRDF 实验室测量精度、参考漫反射板与定标漫反射板表面光学差异性等因素,可以认为定标漫反射板的表面光学性能稳定,尚未发生衰减。所以在求取定标系数过程中,虽然没有对定标漫反射板 BRDF 进行衰减修正,但这并不会对交叉验证精度带来不利影响。

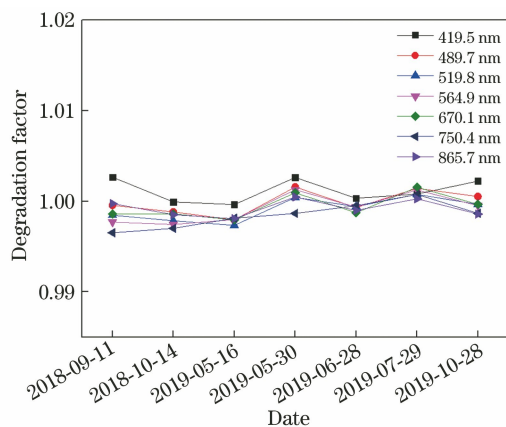


图 10 定标太阳漫反射板的衰减因子

Fig. 10 Degradation factor of calibrated solar diffuser

4) 交叉验证比较的是两颗载荷的辐亮度数据,因此两颗载荷获取定标系数所使用的太阳常数差异性对验证结果也会带来一定误差,文献[30]表明,太阳常数非常稳定,经年变化小于 1%,即两颗载荷所使用的太阳常数给交叉验证结果带来的误差最大不超过 1%。

5) 文中选取 MODIS 对 SCS 的 2018 年 12 月 12 日星上定标系数进行三次交叉验证,结果表明 SCS 定标系统具有较高精度。为了进一步对 SCS

星上太阳漫反射板定标系统的可靠性及定标系数可靠性进行验证,需要结合 OLI (operational land imager) 等定标精度较高的载荷对 SCS 定标系数和定标系统进行长期验证。

4.2 漫反射板的出射辐亮度分析

根据(1)~(3)式可以看出,定标时刻漫反射板出射辐亮度的不确定度直接影响星上定标精度。分析各参数可以发现,影响太阳漫反射板出射辐亮度不确定度的因素主要有大气外太阳辐照度稳定性、太阳漫反射板 BRDF 实验室绝对测量精度、太阳漫反射板发射前衰减系数、太阳漫反射板星上衰减监测精度及太阳衰减屏透过率实验室测量精度等。根据 NASA 地球辐射量观测卫星(ERBS)在 1984 年到 2002 年的长期观测结果可知:大气外太阳辐照度变化小于 1%^[30];发射前,采用中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的 BRDF 绝对测量装置对太阳漫反射板 BRDF 进行测量,近红外波段 BRDF 测量不确定度优于 0.8%;太阳漫反射板在发射前受各种因素影响,表面光学特性发生一定衰减,因此使用跟踪样片表征漫反射板 BRDF 发射前的衰减,此处会引入 0.5% 不确定度;太阳漫反射板采用的是聚四氟乙烯材料,具有较高的表面反射率和优异的朗伯性,其均匀性给定标引入的不确定度为 0.6%;太阳漫反射板安装、相机姿态等因素带来余弦误差为 0.35%;采用中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的双平行光管测试系统对太阳衰减屏透过率进行测试,测试不确定度优于 0.5%;虽然定标漫反射板和参考漫反射板采用的是相同材料和相同工艺,但它们之间的表面光学差异和参考漫反射板自身衰减会给衰减监测带来 0.54% 不确定度;杂散光等其他未知因素引入的不确定度为 1%^[31-32]。综上所述可知,太阳漫反射板出射辐亮度合成不确定度为 1.97%。为了得到 SCS 辐射定标精度,需要对 SCS 星上定标数据和对地观测数据进行跟踪处理,并分析相机响应非线性、输出信号稳定性等因素给星上定标带来的不确定度,再结合太阳漫反射板出射辐亮度合成不确定度,最终完成 SCS 基于太阳漫反射板星上辐射定标的精度评估。

5 结 论

在介绍 SCS 星上太阳漫反射板定标系统的基础上,建立了绝对辐射定标模型,结合 2018 年 12 月 12 日星上漫反射定标数据,得到 SCS 可见近红外 101 个通道的绝对辐射定标系数。以辐射定标精度

较高的 MODIS 作为参考载荷,对 SCS 绝对辐射定标系数的可靠性和精度进行三次交叉验证,比较 MODIS 各通道实测辐亮度与预测辐亮度,结果表明,两组数据具有非常好的一致性,相对偏差最小值为 0.04%,相对偏差最大值为 6.79%,三次验证结果的相对偏差均值最大为 2.78%。可以得出以下结论:基于太阳漫反射板得到的 SCS 绝对辐射定标系数真实可靠,具有较高精度,可用于同平台其他载荷的交叉验证;漫反射板 BRDF 和衰减屏透过率实验室测量精度满足星上定标需求。为了更好地评估 SCS 星上定标精度,需要对星上定标数据进行长期跟踪与分析,并通过不同反射率辐射定标场与地面同步测量数据,对辐射定标结果进行大动态范围内的真实性检验,并结合漫反射板出射辐亮度的不确定度,最终得到 SCS 基于太阳漫反射板的辐射定标精度。

参 考 文 献

- [1] Li Z W, Liu L Y, Zhang H, et al. Radiometric calibration and validation of TG-1 hyper-spectral imager [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(5): 850-857.
李振旺, 刘良云, 张浩, 等. 天宫一号高光谱成像仪在轨辐射定标与验证 [J]. *遥感技术与应用*, 2013, 28(5): 850-857.
- [2] Jia D, Han B, Song Q J, et al. Overview of the onboard calibration techniques applied in ocean color satellites[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2018, 37(1): 113-121.
贾迪, 韩冰, 宋庆君, 等. 海洋水色卫星星上定标技术综述 [J]. *海洋技术学报*, 2018, 37(1): 113-121.
- [3] Zhou G H, Jiang H, Zhao H J, et al. Imaging spectrometry radiometric cross-calibration based on precise spectral response matching[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(12): 3416-3421.
周冠华, 姜禾, 赵慧洁, 等. 基于精确光谱响应匹配的星载成像光谱仪交叉辐射定标 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(12): 3416-3421.
- [4] Dinguirard M, Slater P N. Calibration of space-multispectral imaging sensors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 68(3): 194-205.
- [5] Zheng X B, Zhang L M, Wu H Y, et al. Advanced radiometric calibration techniques for optical remote sensing [J]. *Advances in Marine Science*, 2004, 22(z1): 16-22.
郑小兵, 张黎明, 吴浩宇, 等. 面向光学遥感的先进光谱辐射定标技术 [J]. *海洋科学进展*, 2004, 22(z1): 16-22.
- [6] Zheng X B. High-accuracy radiometric calibration of satellite optical remote sensors [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(5): 36-43.
郑小兵. 高精度卫星光学传感器辐射定标技术 [J]. *航天返回与遥感*, 2011, 32(5): 36-43.
- [7] Markham B L, Helder D L. Forty-year calibrated record of earth-reflected radiance from Landsat: a review[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 122: 30-40.
- [8] Li X H, Yan C X. Onboard calibration technologies for hyper-spectral imager [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(4): 309-315.
李晓晖, 颜昌翔. 成像光谱仪星上定标技术 [J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(4): 309-315.
- [9] Wang M, Zhou S D, He M Y, et al. Characterization and calibration method of satellite sensor radiometric calibration site[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2015, 38(7): 24-27.
王敏, 周树道, 何明元, 等. 国内外卫星遥感器辐射定标场地特性比较分析 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2015, 38(7): 24-27.
- [10] Gao H L, Gu X F, Yu T, et al. The research overview on visible and near-infrared channels radiometric calibration of space-borne optical remote sensors[J]. *Remote Sensing Information*, 2010, 25(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, 25(4): 117-128.
- [11] del Pozo S, Rodríguez-González P, Hernández-López D, et al. Vicarious radiometric calibration of a multispectral camera on board an unmanned aerial system[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(3): 1918-1937.
- [12] Sun L W. Research on radiometric calibration for space hyperspectral remote sensor [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
孙立微. 空间高光谱遥感仪器辐射定标技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [13] Chen H L. Overview of on-board calibration techniques[J]. *Infrared*, 2003, 24(6): 9-14.
陈海龙. 星上定标技术概述 [J]. *红外*, 2003, 24(6): 9-14.
- [14] Zha P. Research on spaceborne radiant calibration technology of space camera [J]. *Infrared*, 2006, 27(3): 32-38.
查鹏. 空间相机星上辐射定标技术的研究 [J]. *红外*, 2006, 27(3): 32-38.
- [15] Singh S M, Cracknell A P. Coastal zone colour scanner: failure of active calibration [J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1982, 15(10):

- 1003-1007.
- [16] Chander G, Helder D L, Markham B L, et al. Landsat-5 TM reflective-band absolute radiometric calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(12): 2747-2760.
- [17] Huang W X, Zhang L M, Si X L, et al. The research of on-orbit calibration method based on solar diffuser [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(3): 952-957.
黄文薪, 张黎明, 司孝龙, 等. 基于太阳漫射板的星上定标方法研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(3): 952-957.
- [18] Heath D F, Georgiev G. Characteristics of a new type of Mie scattering volume diffuser and its use as a spectral albedo calibration standard for the solar reflective wavelength region [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8153: 81530V.
- [19] Waluschka E, Esposito J A, Sun J Q, et al. MODIS solar diffuser: modeled and actual performance [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4483: 146-155.
- [20] Xiong X X, Sun J Q, Esposito J, et al. On-orbit characterization of a solar diffuser's bidirectional reflectance factor using spacecraft maneuvers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5151: 375-383.
- [21] Delwart S, Bourg L. MERIS calibrations: 10 years [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8866: 88660Y.
- [22] Xiong X X, Angal A, Twedt K A, et al. MODIS reflective solar bands on-orbit calibration and performance [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(9): 6355-6371.
- [23] Xiong X X, Aldoretta E, Angal A, et al. Terra MODIS: 20 years of on-orbit calibration and performance [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11127: 1112714.
- [24] Xiong X X, Angal A, Barnes W L, et al. Updates of moderate resolution imaging spectroradiometer on-orbit calibration uncertainty assessments [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2018, 12(3): 034001.
- [25] Zhang K L, Zhang Y C, Ma Y. Design of on orbit cross calibration method for HY-1 C/D satellite [J]. *Spacecraft Engineering*, 2019, 28(2): 24-29.
张可立, 张永超, 马越. 海洋一号 C/D 卫星在轨交叉定标设计 [J]. *航天器工程*, 2019, 28(2): 24-29.
- [26] Gao H T, Ma Y, Liu W, et al. Analysis and simulation of cross calibration precision of ocean color remote sensing [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(2): 116-125.
高慧婷, 马越, 刘薇, 等. 海洋水色遥感交叉定标精度分析与仿真 [J]. *航天返回与遥感*, 2016, 37(2): 116-125.
- [27] Liu H, Chen H Y, Si X L, et al. Linear calibration of wide dynamic range response of silicon detectors based on double LEDs light source integrating sphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0904001.
刘辉, 陈洪耀, 司孝龙, 等. 基于双 LED 光源积分球的硅探测器宽动态范围响应线性定标 [J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0904001.
- [28] Crilly P B. A quantitative evaluation of various iterative deconvolution algorithms [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1991, 40(3): 558-562.
- [29] Zhao H J, Jia G R, Li N. Transformation from hyperspectral radiance data to data of other sensors based on spectral superresolution [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 40(11): 3902-3912.
- [30] Lee R B, Wilson R S. Total solar irradiance (TSI) variability: 1984-2002 earth radiation budget experiment (ERBE) spacecraft measurements [EB/OL]. [2019-11-26]. https://www.researchgate.net/publication/234235689_Total_solar_irradiance_TSI_variability_1984_-_2002_Earth_Radiation_Budget_Experiment_ERBE_spacecraft_measurements.
- [31] Huang W X. The research of on-orbit calibration method based on solar diffuser [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 98-99.
黄文薪. 基于太阳漫射板的星上定标方法研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2016: 98-99.
- [32] Wang W, Zhang L M, Huang W X, et al. Measurement method of solar attenuation screen characteristic for on-orbit calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0928001.
汪伟, 张黎明, 黄文薪, 等. 星上定标衰减屏特性的测试方法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0928001.