

DOI:10.11918/202108080

干涉型成像光谱仪在轨辐射定标技术应用

吕 原¹, 丛明煜¹, 唐 勇², 牛凯庆², 赵旂旒²

(1. 哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 哈尔滨 150006; 2. 中国空间技术研究院 通信与导航卫星总体部, 北京 100094)

摘 要: 为提高干涉型成像光谱仪空间目标测量精度, 降低传感器中各个探测元响应度差异, 提升成像光谱仪在轨辐亮度测量准确性。提出了一种基于定标场反射率测量参数结合计算程序仿真与成像仪在轨测量数据比对的空间定标方法。首先在介绍高光谱定标概念的基础上, 提出了不同光谱响应函数、不同场地条件下的高精度入瞳亮度计算方法; 其次对干涉型成像光谱仪进行在轨相对辐射修正, 校正传感器中各探测元相应度差异, 利用反射率基法开展了在轨绝对辐射定标试验, 针对可见光、近红外波段建立在轨辐射定标计算模型。解决了包括多种反射率场地、高精度测试区域指示的试验方案优化设计问题, 实现了星载高分辨率干涉型成像光谱仪的在轨高精度定标。研究结果表明, 采用该定标技术使成像光谱仪的在轨测量精度达到 5%。此外, 定标场地环境条件对模型计算精度有一定影响, 大面积均匀场适合采用反射率基法, 小面积均匀场则引入邻近像元效应进行计算, 通过布设人工指示目标, 可提高反射率测量数据的准确性。所采用的定标技术已获得工程应用。

关键词: 在轨定标; 干涉成像; 场地定标; 辐射定标; 相对辐射修正; 绝对辐射修正

中图分类号: V443.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)12-0017-10

Application of on-orbit radiometric calibration technology for interferometric imaging spectrometer

LÜ Yuan¹, CONG Mingyu¹, TANG Yong², NIU Kaiqing², ZHAO Yini²

(1. Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China;

2. Institute of Telecommunication and Navigation Satellites, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: To improve the measurement accuracy of interferometric imaging spectrometer for space target, reduce the response difference of each detection element in the sensor, and improve the on-orbit radiance measurement accuracy of imaging spectrometer, we proposed a spatial calibration method based on calibration field reflectance measurement parameters, calculation program simulation, and on-orbit measurement data comparison of imager. Firstly, the concept of hyperspectral calibration was introduced, and a high-precision calculation method of pupil entrance radiance under different spectral response functions and different site conditions was proposed. Secondly, the on-orbit relative radiation correction of the interferometric imaging spectrometer was performed, so as to correct the correspondence difference of each detection element in the sensor. The on-orbit absolute radiometric calibration test was carried out by using reflectance-based method. The on-orbit radiometric calibration calculation model was established for visible and near-infrared bands. The optimization design problems of test scheme including multiple reflectivity sites and high-precision test area indication were solved, which realized high-precision on-orbit calibration of spaceborne high-resolution interferometric imaging spectrometer. Results show that the on-orbit measurement accuracy of imaging spectrometer reached 5% by using this calibration technology. The environmental conditions of the calibration sites had impacts on the calculation accuracy of the model; the reflectance-based method was suitable for large-area uniform field, while the small-area uniform field could be calculated by introducing the adjacent pixel effect. The accuracy of reflectance measurement data could be improved by arranging manual indication targets. The calibration technology has been applied in engineering.

Keywords: on-orbit calibration; interference imaging; site calibration; radiometric calibration; relative radiation correction; absolute radiation correction

高光谱定标包括光谱定标和辐射定标, 文献[1-5]研究了在轨辐射定标的模型和方法。其中光谱定

标是确定辐射响应对应的波长位置, 对于干涉型光谱仪而言在于确定一个像元对应的干涉光程差。辐射定标包括相对辐射定标和绝对辐射定标, 相对辐射定标的目的在于消除探测元响应的不一致性, 绝对辐射定标是为了建立探测器输出值与该探测器对应的实际地物辐射亮度之间的定量关系, 是成像仪

收稿日期: 2021-08-20

作者简介: 吕 原(1982—), 男, 博士研究生;

丛明煜(1964—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 吕 原, hit_ly2020@163.com

数据量化应用的前提。为了保证后续反射率反演的精度以及高光谱数据应用效果,必须对高光谱成像仪进行高精度的绝对辐射定标。但是由于干涉型成像体制的特点,该成像体制下获取的地物每个谱段的信息都需要从对应列所有行 CCD 输出信息中进行复原得到,因此谱段的光谱响应函数难以测量。而且星上没有绝对辐射定标装置,必须通过场地法进行绝对辐射定标,文献[6-11]研究了利用卫星开展各类在轨定标试验。利用场地法进行在轨绝对辐射定标,定标场地的选择和设计对定标精度有较大影响。从误差理论而言,场地的数量越多越好,场地的反射率最好涵盖从 0~1 所有范围,目前中国仅建设有用于校正可见短波红外谱段的载荷在轨定标场,场地反射率约为 0.2~0.3,场地单一,对在轨定标研究形成较大约束,文献[12-13]对定标场地的特性进行了研究。本文针对高光谱成像仪仪器的特点和中国场地条件的限制问题,利用均匀场地实现在轨辐射定标,保证了反射率测量数据使用的准确性,为光谱仪在轨可靠运行提供技术支持。

1 场地定标

场地定标,又叫替代定标(vicarious calibration),是上世纪 70 年代开始发展起来的一种定标方法,该方法是控制卫星对定标场地成像,同步在地面测量地表参数和大气参数,计算成像时刻场地目标在大气顶层的辐亮度,与图像中场地的灰度值进行拟合,以得到绝对辐射定标参数。在进行绝对辐射定标前,还需要对高光谱产品进行相对辐射修正,以提高图像的相对辐射质量。

2 在轨相对辐射修正

相对辐射修正就是为了校正传感器中各个探测元

响应度差异,对卫星传感器的原始数字计数值(DN 值)进行再量化的一种处理过程,可消除探测元之间响应不一致引起的条带效应。

2.1 相对辐射修正算法及流程

目前在轨相对辐射修正采用的方法主要有直方图均衡法、直方图匹配法、均匀地物法等,其中直方图均衡法和直方图匹配法均为统计法,受到很多外界条件限制,均匀地物的相对辐射修正方法可以标定出各个探测元的真实差异,得到的相对辐射修正系数对同档位的卫星影像均适用。本文以均匀场相对辐射修正方法为主,均衡法相对辐射修正方法为辅完成高光谱卫星影像的相对辐射修正。

本文选择均匀性优于 2% 的区域作为均匀场,选择均匀性优于 2% 的均匀地表作为在轨相对辐射定标参照,保证了 3% 相对辐射定标精度的实现,然而却又带来了面积难以覆盖全幅宽的问题。文献[14]对在轨场地辐射定标方法精度进行评估。对此,本文采用了基于均匀场的分区综合的相对辐射修正算法,很好地解决了这一问题。

基于均匀场地分区综合的相对辐射修正中区域(片)内定标原理与均匀场地两点定标法的定标原理相同,但分区综合修正法的修正过程分为:

- 1) 先将传感器划分为若千的区域(片),利用区域内均匀一致的高辐亮度及低辐亮度地物景观计算区域(片)内探测元的相对修正系数,并进行相对修正;
- 2) 根据修正后的图像并利用区域(片)间的重合,计算相邻区域(片)之间的区域(片)间相对修正系数;
- 3) 结合区域(片)内部相对修正系数、区域(片)之间相对修正系数将相机的全体探测元相对修正到一致。如图 1 所示,说明了该方法的实现过程。

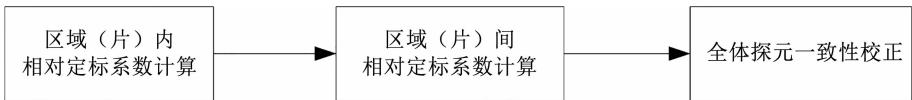


图 1 基于均匀场地分区综合的相对辐射修正过程

Fig. 1 Relative radiation correction process based on regional synthesized uniform field

根据上述基于均匀场地分区综合的相对辐射修正过程,该方法的实现流程中区域(片)内相对修正系数计算,对于均匀场地完全覆盖传感器所有探测元的情况而言,可以一次直接完成传感器的定标任务。但在均匀场地未覆盖传感器所有探测元时,要重复区域(片)内相对修正系数计算,至于重复的次数,需要视具体均匀场地的选择情况而定。相邻区域(片)之间的区域(片)间相对修正系数计算必须

按照两边区域(片)逐步向中间区域(片)靠拢的顺序,计算相邻区域(片)之间的修正系数。全体探测元一致性校正也是按照区域(片)间计算的原则加以校正,即两边向中间校正。

2.2 高光谱成像仪的相对辐射修正

选用高光谱成像仪拍摄典型的 2 处沙漠图像(沙漠 1 和沙漠 2),进行在轨相对辐射修正系数计算,使用计算出的相对修正系数,对其他图像进行相

对辐射校正。从图 2、3 可以看到,修正前图像存在等间隔的细条纹和随机的粗条纹,修正后图像中条纹被去除。

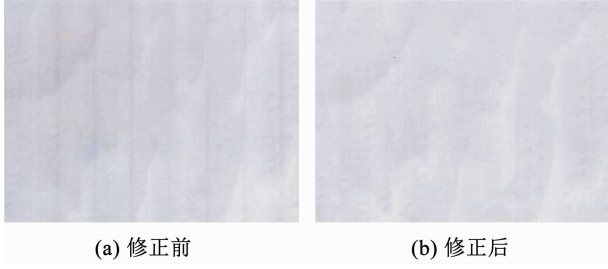


图 2 可见近红外波段相对辐射修正效果对比图(沙漠 1)

Fig. 2 Comparison of relative radiation correction effect of visible and near-infrared bands (desert field 1)

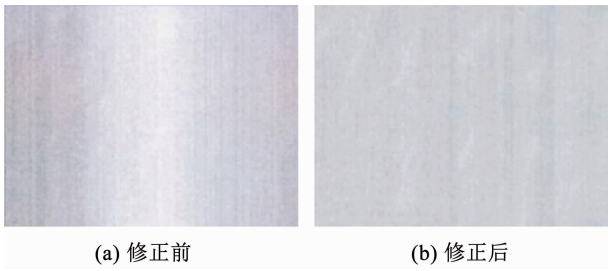


图 3 短波红外波段相对辐射修正效果对比图(沙漠 2)

Fig. 3 Comparison of relative radiation correction effect of short wave infrared band (desert field 2)

2.3 高光谱成像仪相对辐射定标精度评定

本文使用平均行标准差法计算在轨相对辐射定标精度。具体计算公式为

$$RCP = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\overline{DN}_i - \overline{DN})^2}{N}}}{\overline{DN}} \times 100\% \quad (1)$$

影响相对辐射定标精度的因素主要包括相对定标方法的精度和相机性能的精度,基于均匀场地的分区综合相对辐射定标方法,其定标精度主要取决于所选取地物的均匀性与多块区域联合的算法模型精度。故进行相对辐射定标精度计算前,首先选取均匀度满足要求的均匀场地图像,进行相对辐射校正,对校正后图像进行精度评价,得到相对定标精度。选择能覆盖图像全幅宽的均匀区域进行相对辐射定标精度计算。计算结果表明:可见近红外(CCD)波段相对定标精度均值为 2.88%,短波红外(IRS)波段相对定标精度为 2.26%。

3 在轨绝对辐射定标

在轨场地绝对辐射定标方法主要有反射率基法、辐亮度基法和辐照度基法,文献[15]研究了采用反射率基法辐射定标的原理和流程。辐亮度基法

利用经过高精度定标的光谱辐射计在地面直接测量定标场表面出射辐射的光谱辐亮度,同时进行气象探空测量获取大气温湿压廓线,并将相关的大气参数和气象参数输入到大气辐射传输模型,计算出大气透过率和上行大气路径的程辐射,然后结合地面测量的定标场表面辐亮度,由理论公式推算出传感器入瞳处对应通道的表观辐亮度。用这个表观辐亮度值与其对应测区图像像元数字值的平均值相比就得到该谱段的定标系数。由于这种方法所需的参量(如地面光谱辐亮度、能见度和温湿压廓线等)都是卫星过顶的同时获取的,只要能保证这些参量的测量精度,该方法得到的定标结果具有较高的可靠性。

反射率基法是把测得的地表反射率和气溶胶光学厚度输入辐射传输计算程序,然后计算出大气层顶的表观辐亮度或表观反射率,将表观辐亮度或表观反射率与卫星计数值相比较得到定标系数。该程序所需的其他输入数据有:气溶胶的光学厚度和分子散射、气溶胶散射。其散射解还要加入气体吸收订正,包括在要标定的光谱通道上臭氧、水汽、二氧化碳和氧的吸收订正。这种方法的一个重要误差来源是对气溶胶散射的一些近似,如对气溶胶模型的假设,不同的气溶胶模型会对表观反射率的计算造成较大影响。

辐照度基法是反射率基法的改进,其与反射率基法相比,辐射传输计算程序所用的输入量除反射率法和气溶胶光学厚度外,增加了向下到达地面的漫射辐射与总辐射之比(可以由辐照度计同步测量得到)。这一比值包含了气溶胶的散射特征,以实测的辐照度漫总比代替反射率基法中计算气溶胶散射的假定,可以减少因气溶胶模型近似而产生的误差。

由于辐照度基法使用过程中所需同步测量数据较多,本文在进行绝对辐射定标时,主要使用反射率基法,当测量数据满足应用要求时可使用辐照度基法。下面对反射率基法的算法和流程进行介绍。

3.1 绝对辐射定标算法及流程

对于反射率为 ρ 的均匀朗伯地面,传感器入瞳处的表观反射率为

$$\rho * (\theta_v, \theta_s, \varphi_v - \varphi_s) = T_g(\mu_s, \mu_v) \times \left[\rho_A(\theta_v, \theta_s, \varphi_v - \varphi_s) + \frac{T(\mu_s) \rho T(\mu_v)}{1 - \rho \cdot S} \right] \quad (2)$$

式中: θ_v 、 φ_v 分别为观测天顶角、方位角, θ_s 、 φ_s 分别为太阳天顶角、方位角, T 为总的大气散射通过率, T_g 为气体吸收通过率, ρ_A 为大气内反射率, S 为大气球面反照率。

传感器入瞳处的反射率与表观辐亮度的关系为

$$\rho^* = \frac{\pi L_e}{\mu_s E_s} \tag{3}$$

L_e 与遥感器对应输出信号的数字量化值 DN 之间的定量关系呈线性关系:

$$L_e = A \times DN + B \tag{4}$$

式中 A 、 B 即为要获得的绝对辐射定标系数。

在轨绝对辐射定标方法流程如图 4 所示。高光
谱成像仪解干涉后的产品可能存在纵向条纹,在提

取图像 DN 值之前,需要对其进行相对辐射修正,消除条纹使每个通道所有探测元响应一致。

辐照度基法在轨绝对辐射定标流程比反射率基法在轨绝对辐射定标流程复杂,在反射率基法流程的基础上,将实测漫总比带入计算入瞳辐亮度,校正辐射传输模型中对气溶胶模式假设所带来的误差,辐射定标流程如图 5 所示。

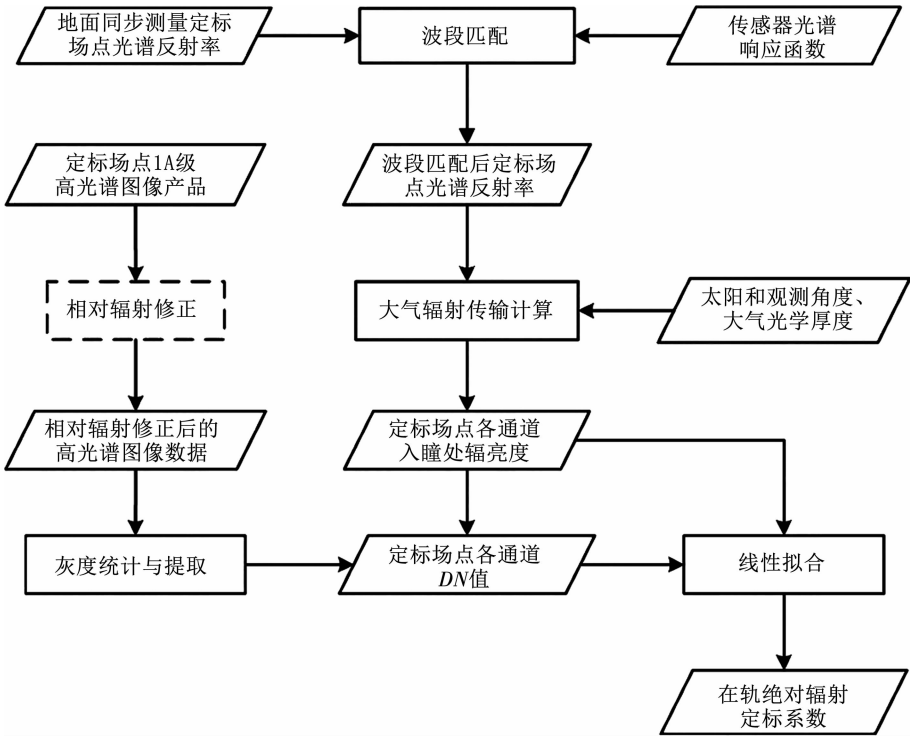


图 4 反射率基法在轨绝对辐射定标流程

Fig. 4 On-orbit absolute radiometric calibration process based on reflectance-based method

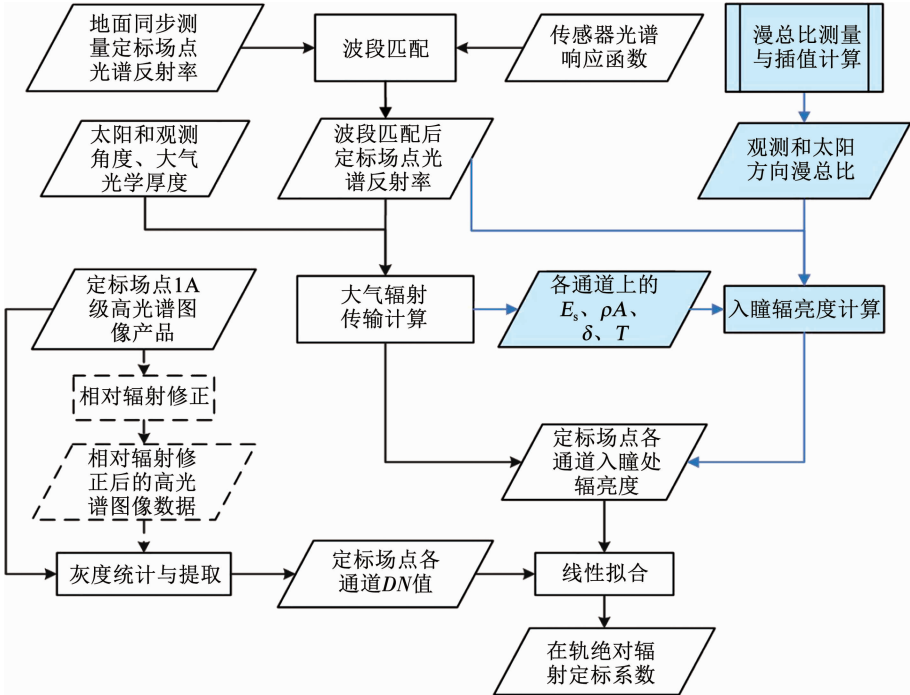


图 5 辐照度基法在轨绝对辐射定标流程

Fig. 5 On-orbit absolute radiometric calibration process based on irradiance-based method

3.2 绝对辐射定标星地同步实验

试验历时 2 个多月,共选择 3 个试验场,其中两个子场地为戈壁场和高反场。戈壁场布设有 160 m × 160 m 的黑网,一方面用来做低反射率测试点,另外一方面用来指示戈壁滩的测试区域。高反场反射率较高,测试区域位于一凹地附近,场地均匀。第 3 个试验场选择沙漠试验场,面积约 20 km × 20 km。试验测试区位于该沙漠的北侧、面积约 10 km × 1 km 的区域,在测试点布设少量黑网。试验场地及测试区域地貌如图 6 所示。



图 6 试验场地及测试区域
Fig. 6 Test sites and test areas

开展同步试验 21 次,成功或部分成功 8 次,仪器比对试验 6 次。成功或部分成功试验情况见表 1。

表 1 试验获取情况
Tab. 1 Overall test conditions

日期	测试区域	卫星天顶角/(°)	气溶胶光学厚度(550 nm)	水汽含量/(g·cm ⁻²)
6 月 22 日	戈壁	25.4	0.218	1.05
6 月 27 日	沙漠	15.0	0.179	1.12
7 月 6 日	高反	6.7	0.219	2.12
7 月 27 日	戈壁	30.7	0.300	1.69
8 月 2 日	戈壁	29.9	0.143	1.13
8 月 2 日	高反	29.9	0.175	1.20
8 月 4 日	沙漠	10.8	0.277	1.92
8 月 6 日	戈壁	6.8	0.155	1.52
8 月 20 日	戈壁	22.6	0.176	1.75
8 月 20 日	高反	22.6	0.161	1.46

3.2.1 可见近红外波段绝对定标参数计算

进行可见光波段绝对定标系数的计算,选取 6 月 27 日沙漠场、7 月 6 日高反场和 8 月 20 日戈壁场,采用这几个场地的原因是:1) 反射率均为过顶当天测量数据;2) 场地大气特性参数均使用 CE318 或 CE317 测量,反演数据准确可靠;3) 6 月 27 日和 8 月 20 日有可以使用的漫总比数据;4) 3 维数据可构成高低不同的 4 个反射率点。

采用反射率基法计算定标系数见表 2。
采用反射率基法计算可见光波段定标系数过程中,对其各通道 *DN* 值与辐亮度 *L* 间的线性关系进

行了评价,各通道线性相关系数见表 3。其中,第 3、10、23、40、60 通道为与 MODIS 进行交叉验证的通道。

从表 3 可以看到,可见光波段前 8 个以及第 63 个通道,由于信噪比低,响应线性较差,线性相关系数小于 0.99,其他通道响应线性较好,线性相关系数大于 0.99,说明这些通道不同日期测量的数据结果相关性高,可以生成定标参数。

表 2 可见光波段定标系数(反射率基法)
Tab. 2 Calibration coefficient in visible band (reflectance-based method)

序号	K	B	序号	K	B
1	-0.006 610	327.001 600	33	0.040 473	-12.764 100
2	-0.000 670	117.853 000	34	0.041 690	-13.201 800
3	-0.000 620	102.962 000	35	0.044 535	-13.510 900
4	-0.002 510	107.083 000	36	0.044 775	-12.604 100
5	0.069 331	-70.700 000	37	0.044 394	-12.516 600
6	0.084 628	-84.896 000	38	0.042 351	-12.067 900
7	0.044 121	16.717 820	39	0.039 954	-13.010 800
8	0.057 817	0.340 357	40	0.039 707	-14.087 900
9	0.052 617	-10.373 600	41	0.039 378	-14.394 100
10	0.043 119	-5.390 280	42	0.037 944	-14.985 800
11	0.043 222	-8.271 720	43	0.036 052	-15.083 600
12	0.047 177	-13.870 500	44	0.036 713	-14.727 500
13	0.049 574	-11.532 000	45	0.041 818	-15.556 100
14	0.054 286	-12.320 900	46	0.043 962	-15.424 800
15	0.056 388	-10.347 200	47	0.038 458	-10.949 500
16	0.052 309	-6.829 080	48	0.040 351	-10.424 600
17	0.047 080	-5.601 370	49	0.041 431	-11.071 900
18	0.044 747	-5.123 030	50	0.041 909	-11.502 900
19	0.045 406	-6.538 600	51	0.032 300	-9.915 140
20	0.045 778	-6.361 990	52	0.035 099	-10.952 000
21	0.045 360	-7.640 090	53	0.040 829	-12.650 800
22	0.045 369	-10.757 100	54	0.040 876	-13.254 900
23	0.045 343	-11.877 500	55	0.042 424	-13.394 500
24	0.045 480	-13.836 800	56	0.040 548	-10.757 300
25	0.045 874	-15.641 500	57	0.038 503	-9.387 540
26	0.048 098	-17.644 100	58	0.041 657	-9.898 850
27	0.049 411	-18.965 200	59	0.041 440	-9.761 610
28	0.050 412	-19.244 300	60	0.043 621	-10.269 900
29	0.050 268	-18.293 100	61	0.050 681	-11.670 100
30	0.045 371	-14.635 200	62	0.078 970	-16.693 700
31	0.042 807	-13.247 700	63	0.118 094	-11.663 100
32	0.040 437	-13.828 100			

注:其中 K,(W/m²/sr/um)/DN;B,W/m²/sr/um。

表 3 可见光波段各通道响应线性情况(反射率基法)

Tab.3 Response linearity of each channel in visible band
(reflectance-based method)

序号	线性度	序号	线性度
1	-0.998 500	33	0.997 129
2	-0.604 100	34	0.997 756
3	-0.735 010	35	0.998 025
4	-0.021 650	36	0.998 079
5	0.979 918	37	0.998 016
6	0.982 379	38	0.997 594
7	0.850 113	39	0.998 190
8	0.984 491	40	0.998 450
9	0.995 873	41	0.998 671
10	0.999 536	42	0.998 752
11	0.999 631	43	0.998 975
12	0.998 939	44	0.998 634
13	0.996 831	45	0.998 198
14	0.994 884	46	0.997 086
15	0.996 437	47	0.998 347
16	0.997 746	48	0.998 257
17	0.999 140	49	0.997 934
18	0.999 554	50	0.997 895
19	0.999 492	51	0.998 703
20	0.999 381	52	0.998 706
21	0.998 995	53	0.998 241
22	0.998 302	54	0.997 753
23	0.998 221	55	0.996 789
24	0.998 667	56	0.997 373
25	0.999 004	57	0.998 173
26	0.999 200	58	0.997 447
27	0.999 006	59	0.997 387
28	0.999 003	60	0.998 149
29	0.998 800	61	0.998 412
30	0.998 403	62	0.999 743
31	0.997 872	63	-0.910 110
32	0.997 148		

采用辐照度基法,利用 6 月 27 日沙漠场和 8 月 20 日戈壁场也可以生成绝对定标参数。

图 7 为使用辐照度法和反射率法计算得到的 6 月 27 日沙漠入瞳辐亮度曲线。从图 7 中可以看出,辐照度法和反射率法计算出的人瞳辐亮度,在 500 nm 之前差别较大,最大相对误差为 5.27%; 500 nm 之后两者的相对误差小于 2.00%。这是因为波长越短,气溶胶模型假设对辐射亮度计算的精度影响越大。

3.2.2 短波红外波段绝对定标参数计算

进行短波红外波段绝对定标参数计算选取 6 月 27 日和 8 月 4 日沙漠场和 8 月 20 日戈壁场,原因是:1)场地在短波红外波段光谱平坦;2)反射率均为过顶当天测量,准确度高;3)场地大气特性参数均使用 CE318 测量,反演数据准确。

采用反射率基法计算定标系数见表 4。

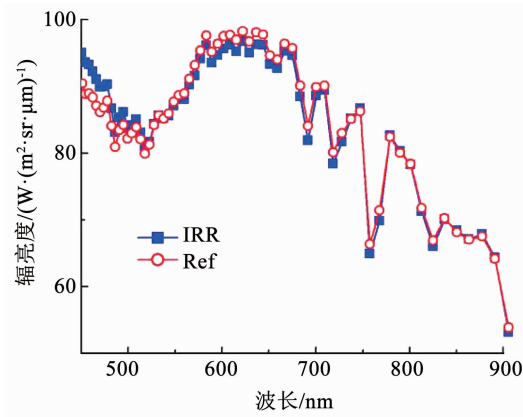


图 7 6 月 27 日沙漠入瞳辐亮度曲线比较(反射率基法 Ref 和辐照度基法 IRR)

Fig. 7 Comparison of radiance at entrance pupil on desert field on June 27 (reflectance-based method Ref and irradiance-based method IRR)

表 4 近红外波段定标系数

Tab. 4 Calibration coefficient in near-infrared band

序号	K	B	序号	K	B
1	0.007 656	12.410 46	31	0.002 924	13.596 40
2	0.008 463	15.501 90	32	-0.007 250	3.190 25
3	-0.003 420	58.351 96	33	0.012 197	-4.373 55
4	0.002 972	13.954 16	34	0.014 326	-1.828 42
5	-0.001 320	26.634 13	35	0.014 232	2.967 31
6	0.008 949	6.831 22	36	-0.001 170	13.515 00
7	0.008 091	14.495 19	37	0.006 141	-0.157 59
8	0.007 296	15.770 86	38	0.005 867	3.838 06
9	0.007 296	16.381 37	39	0.005 560	3.055 51
10	0.008 085	10.758 38	40	0.005 739	1.668 00
11	0.008 031	10.290 49	41	0.005 959	1.468 54
12	0.008 015	10.138 50	42	0.005 940	1.951 68
13	0.008 822	6.198 94	43	0.005 730	1.672 87
14	0.010 050	-0.168 05	44	0.005 450	1.225 54
15	0.010 237	-0.680 78	45	0.005 475	1.612 94
16	0.010 130	4.525 25	46	0.005 930	2.906 70
17	0.011 707	9.833 95	47	0.009 200	0.268 40
18	-0.007 540	42.032 25	48	-0.013 830	2.787 21
19	0.007 046	11.966 84	49	0.002 974	-1.030 19
20	0.002 542	15.368 03	50	-0.000 820	1.205 69
21	0.006 068	7.972 41	51	0.005 486	0.423 13
22	0.007 917	5.494 02	52	0.004 793	0.333 84
23	0.007 807	3.941 80	53	0.004 262	1.124 20
24	0.006 698	6.368 28	54	0.004 900	0.908 82
25	0.006 911	6.203 54	55	0.005 019	0.473 84
26	0.007 574	3.916 55	56	0.004 979	0.036 75
27	0.007 629	2.349 08	57	0.006 096	0.158 07
28	0.006 767	5.221 76	58	0.006 910	0.552 61
29	0.006 721	7.839 88	59	0.001 755	2.791 70
30	0.007 636	9.876 31	60	-0.001 820	2.672 97

注:其中 K,(W/m²/sr/μm)/DN;B,W/m²/sr/μm。

采用反射率率基法计算短波红外波段定标系数过程中,对其各通道 DN 值与辐亮度 L 间的线性关系进行了评价,见表 5。可以看出,与可见近红外光谱仪不同,短波红外光谱仪只有少数几个通道(通道 1~2、8、23~25、37、41~43、51、57~58,共 13 个)的响应线性度大于 0.99,其他都小于 0.99。

表 5 近红外波段各通道响应线性情况
Tab. 5 Response linearity of eachchannel in near-infrared band

谱段序号	R	谱段序号	R
1	0.998 792	31	0.846 370
2	0.996 621	32	-0.970 460
3	-0.952 750	33	0.414 228
4	0.784 095	34	0.793 059
5	-0.592 560	35	-0.004 630
6	0.814 021	36	-0.977 470
7	0.948 452	37	0.992 365
8	0.990 370	38	0.945 879
9	0.985 540	39	0.956 656
10	0.978 549	40	0.976 396
11	0.969 804	41	0.990 211
12	0.973 958	42	0.994 475
13	0.982 284	43	0.993 834
14	0.982 070	44	0.982 112
15	0.966 531	45	0.939 607
16	0.942 713	46	0.834 157
17	0.915 987	47	0.716 076
18	-0.908 060	48	-0.823 230
19	0.841 742	49	0.713 708
20	0.695 073	50	-0.658 810
21	0.794 124	51	0.999 991
22	0.925 375	52	0.975 803
23	0.995 816	53	0.960 598
24	0.999 913	54	0.971 002
25	0.999 095	55	0.978 626
26	0.983 366	56	0.987 182
27	0.938 722	57	0.993 917
28	0.880 971	58	0.997 449
29	0.871 685	59	0.442 402
30	0.862 247	60	-0.984 450

3.2.3 两次定标结果比较

比较 2 次在轨定标结果,将 2 次定标结果分别用于生产同一天的产品,选择 2013 年 8 月 4 日沙漠、8 月 6 日戈壁滩),从产品中提取利用 2 次定标参数分别处理得到的测试区域入瞳处辐亮度值,如图 8~10 所示。

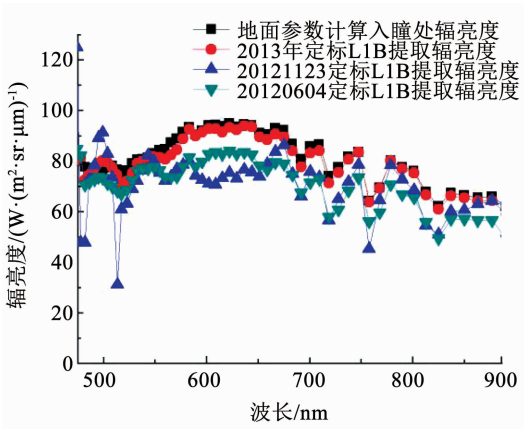


图 8 不同时期定标参数的光谱辐亮度比较(8 月 4 日沙漠可见近红外波段)

Fig. 8 Spectral radiance comparison of calibration parameters in different periods (visible and near-infrared bands of desert field on August 4)

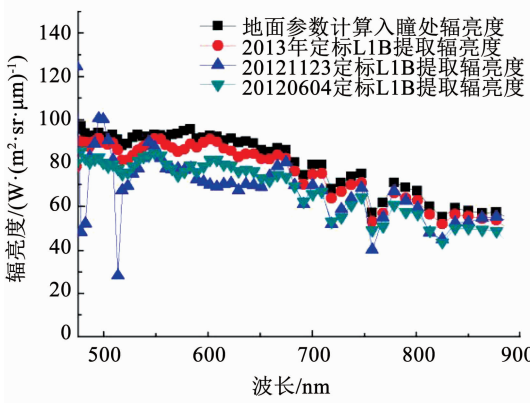


图 9 不同时期定标参数的光谱辐亮度比较(8 月 6 日戈壁可见近红外波段)

Fig. 9 Spectral radiance comparison of calibration parameters in different periods (visible and near-infrared bands of Gobi field on August 6)

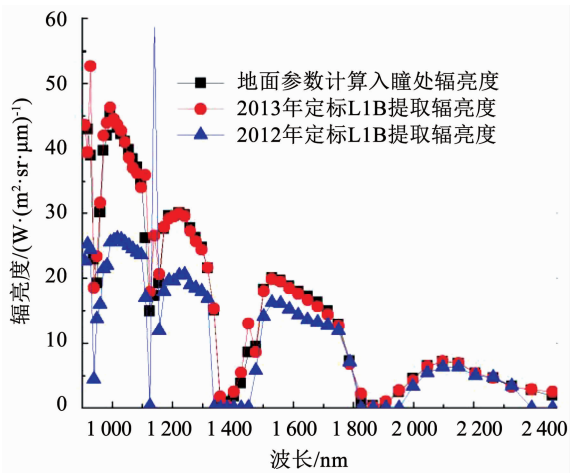


图 10 不同时期定标参数的光谱辐亮度比较(8 月 6 日戈壁近波红外波段)

Fig. 10 Spectral radiance comparison of calibration parameters in different periods (near-infrared band of Gobi field on August 6)

可以看出,利用 2012 年定标参数生成的辐亮度值与本次定标结果生成的辐亮度值曲线形状一致,但数据上要低于本次定标参数生成的结果以及地面实测的结果,说明高光谱成像仪的辐射响应已发生变化,而且是响应能力变弱。也说明了需要开展本次定标工作,以更新在轨绝对辐射定标参数。

4 绝对辐射定标精度评定

利用外场同步测量数据进行定标精度的验证分析,按照以下步骤进行:

1) 用计算出的定标系数作用于定标计算中没有使用的高光谱图像产品,生产出辐亮度图像产品,从中提取待场点的光谱辐亮度;

2) 待验证场点的光谱反射率匹配到高光谱成像仪对应通道,将匹配后的光谱反射率数据和大气参数带入 6S 辐射传输模型中,计算得到场点同步测量的光谱辐亮度;

3) 比对待验证场点辐亮度图像产品和同步测量的光谱辐亮度,统计所有通道两者间相对误差。

扣除相应响应线性差、光谱测量时信号差的通道(吸收通道),计算剩余通道相对误差的平均值。统计多次的相对误差,评定定标精度。

将反射率基法计算出的可见光波段定标系数作用于 8 月 2 日高反场地、8 月 4 日沙漠场、8 月 6 日戈壁场产品,进行绝对辐射校正得到辐亮度图像,从中提取高反场、沙漠、戈壁和黑网的光谱辐亮度曲线与地面同步测量的光谱辐亮度对比情况及相对误差曲线如图 11 ~ 14 所示。地面同步测量光谱辐亮度为蓝色菱形标识曲线,辐亮度图像中提取光谱辐亮度为绿色矩形标识曲线,各通道的相对误差曲线为红色圆形标识曲线。

从图 11 ~ 14 可以看到,辐亮度图像中提取的与地面同步测量的光谱辐亮度曲线形状一致,数值差别较小。扣除响应线性差的 1 ~ 7 通道及 63 通道,这几个场地剩余通道的平均相对误差分别为 5.160%、3.601%、4.508%、6.107%,平均 4.800%。剩余通道相对误差分布情况见表 6。

从表 6 中可以看到,可见光波段高反场辐亮度图像和地面同步测量的光谱辐亮度间的相对误差,55 个有效通道中,有 42 个通道相对误差 < 7%,13 个通道相对误差在 7% ~ 10% 之间,没有相对误差的通道 > 10%;可见光波段沙漠场辐亮度图像和地面同步测量的光谱辐亮度间的相对误差,55 个有效通道中,有 50 个通道相对误差 < 7%,5 个通道相对误差在 7% ~ 10% 之间,没有相对误差的通道 > 10%;可见光波段戈壁场辐亮度图像和地面同步

测量的光谱辐亮度间的相对误差,55 个有效通道中,有 54 个通道相对误差 < 7%,1 个通道相对误差在 10% ~ 20% 之间;可见光波段黑网辐亮度图像和地面同步测量的光谱辐亮度间的相对误差,55 个有效通道中,有 35 个通道相对误差 < 7%,5 个通道相对误差在 7% ~ 10% 之间,10 个通道相对误差在 10% ~ 20% 之间,没有相对误差的通道 > 20%,黑网通道误差大的原因是该地物反射率只有 5% 左右,信号强度较低。



图 11 8 月 2 日高反场辐亮度图像与地面同步测量光谱辐亮度比较(可见)

Fig. 11 Comparison between spectral radiance of high reflection field and ground measurement on August 2 (visible band)

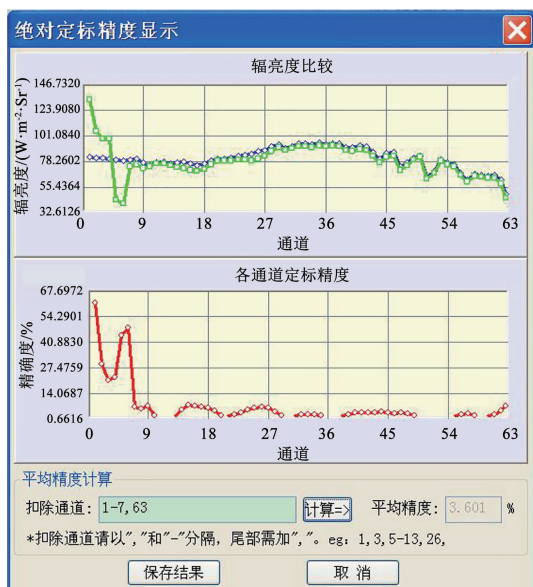


图 12 8 月 4 日沙漠场辐亮度图像与地面同步测量光谱辐亮度比较(可见)

Fig. 12 Comparison between spectral radiance of desert field and ground measurement on August 4 (visible band)

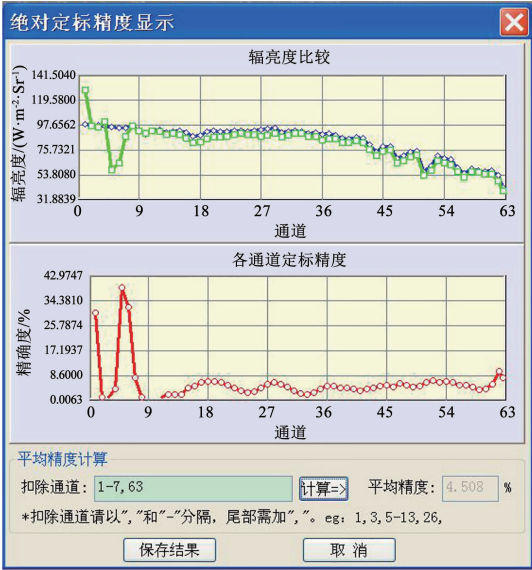


图 13 8 月 6 日戈壁场辐亮度图像与地面同步测量光谱辐亮度比较(可见)

Fig. 13 Comparison between spectral radiance of Gobi field and ground measurement on August 6 (visible band)

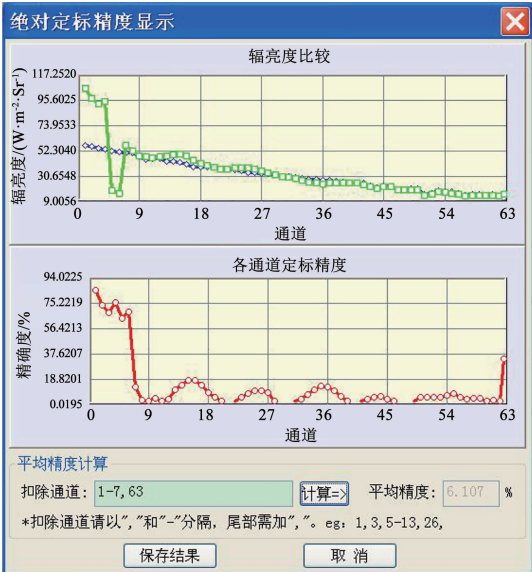


图 14 8 月 6 日黑网辐亮度图像与地面同步测量光谱辐亮度比较(可见)

Fig. 14 Comparison between spectral radiance of black net and ground measurement on August 6 (visible band)

表 6 可见光近红外波段相对误差分布

Tab. 6 Relative error distribution of visible and near-infrared bands

场点名称	有效通道数	相对误差			
		<7%通道数	7% ~ 10%通道数	10% ~ 20%通道数	>20%通道数
高反场	55	42	13	0	0
沙漠场	55	50	5	0	0
戈壁场	55	54	0	1	0
黑网	55	35	5	10	0

通过比对分析定标场点辐亮度图像和地面同步测量的光谱辐亮度间的相对误差,认为辐亮度图像和地面同步测量的光谱辐亮度曲线形状一致,数值接近,误差 <7% 的通道数约占有效通道数的 50% 以上,本次试验获取定标系数有效。

5 结 论

1) 本文针对测量场地受限问题,结合空间分辨率特点,设计了涵盖从高到低不同反射率的定标场地。设计开发了辐射校正场北侧 40 km 处的结晶盐以及沙漠作为辐射定标场地,两块场地反射率分别为 0.4 ~ 0.5 和 0.3 左右,同时在戈壁辐射校正场布设人工的黑色靶标作为另一块定标场地,反射率约 0.1。

2) 通过对干涉成像仪探测元相对辐射校正后,在轨进行成像仪的绝对辐射定标,大幅度提高了设备探测精度。

3) 定标场地环境不同,采用的定标方法不同。场地条件的不同给入瞳处辐亮度计算带来了困难。为保证每个场地的入瞳处辐亮度计算精度,算法设计中考虑了引入周边环境影响,对于大面积均匀场地,采用传统的反射率基法或辐照度进行计算,对于小面积均匀场地,则引入邻近像元效应进行计算,保证不同场地条件下的入瞳处辐亮度计算精度。

4) 通过在结晶盐场地寻找或布设人工指示目标、在戈壁场地通过人工靶标指示等方法,准确确定反射率的测试区域,保证了反射率测量数据使用的准确性,实现了高精度绝对辐射定标,为成像仪数据量化应用提供了可靠保证。

参考文献

[1] 张勇, 祁广利, 戎志国. 卫星红外遥感器辐射定标模型与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 21
ZHANG Yong, QI Guangli, RONG Zhiguo. The model and method of radiometric calibration for satellite infrared remote sensor [M]. Beijing: Science Press, 2015: 21

[2] 冯绚, 韩昌佩, 邹耀璞, 等. 红外傅里叶光谱仪在轨光谱定标算法研究 [J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0630002
FENG Xun, HAN Changpei, ZOU Yaopu, et al. On-orbit spectral calibration algorithm of infrared Fourier transform spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0630002. DOI: 10.3788/AOS201939.063002

[3] 徐骏. 基于热红外标准辐射亮度计的常温黑体定标方法研究 [D]. 合肥: 中国科学院大学, 2013: 61
XU Jun. Research on calibration of ambient temperature blackbodies on a thermal-infrared standard radiometer [D]. Hefei: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 61

[4] 韦伟. 基于全球定标场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: 1
WEI Wei. Research on long time series radiometric calibration of satellite sensor based on global calibration site network [D]. Hefei:

- University of Science and Technology of China, 2017; 1
- [5] 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
LÜ Jiayan, HE Mingyuan, CHEN Lin, et al. Automated radiation calibration method based on Dunhuang radiometric calibration site[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0801003. DOI: 10.3788/AOS201737.0801003
- [6] 张孟, 韦玮, 张艳娜, 等. 基于场地自动化观测技术的 SNPP VIIRS 高频次在轨辐射定标[J]. 光子学报, 2019, 48(4): 0428001
ZHANG Meng, WEI Wei, ZHANG Yanna, et al. High-frequency on orbit radiometric calibration of SNPP VIIRS based on in-site automated observation technology[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(4): 0428001. DOI:10.3788/gzxb20194804.0428001
- [7] 巩慧, 田国良, 余涛, 等. MODIS 可见近红外波段定标与真实性检验[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(1): 109
GONG Hui, TIAN Guoliang, YU Tao, et al. Calibration and validation of MODIS visible and near-infrared bands[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010, 34(1): 109. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0291.2010.01.023
- [8] 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
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. DOI: 10.3788/AOS201636.0701001
- [9] 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
ZHANG Meng, WEI Wei, ZHANG Yanna, et al. On-orbit automated calibration of Hyperion hyperspectral remote sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0528002. DOI: 10.3788/AOS201939.0528002
- [10] 戎志国, 张玉香, 贾凤敏, 等. 利用南海水面开展我国静止气象卫星红外通道在轨辐射定标[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(2): 97
RONG Zhiguo, ZHANG Yuxiang, JIA Fengmin, et al. On-orbit radiometric calibration of Fengyun geostationary meteorological satellite's infrared channels based on sea-surface measurements in the South China Sea[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007, 26(2): 97. DOI: 10.3321/j.issn:1001-9014.2007.02.005
- [11] 胡秀清, 戎志国, 邱康睦, 等. 利用青海湖对 FY-1C、FY-2B 气象卫星热红外通道进行在轨辐射定标[J]. 空间科学学报, 2001, 21(4): 370
HU Xiuqing, RONG Zhiguo, QIU Kangmu, et al. In-flight radiometric calibration for thermal channels of FY-1C and FY-2B meteorological satellite sensors using Qinghai lake[J]. Chinese Journal of Space Science, 2001, 21(4): 370. DOI: 10.3969/j.issn.0254-6124.2001.04.012
- [12] 张允祥, 李新, 韦玮, 等. 基于多通道温度与发射率分离算法的敦煌场地红外特性研究[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1028003
ZHANG Yunxiang, LI Xin, WEI Wei, et al. Infrared characteristics of Dunhuang site based on multi-channel temperature and emissivity separation algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1028003. DOI: 10.3788/AOS201939.1028003
- [13] 张勇, 李元, 戎志国, 等. 中国遥感卫星辐射校正场陆表热红外发射率光谱野外测量[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(5): 1213
ZHANG Yong, LI Yuan, RONG Zhiguo, et al. Field measurement of Gobi surface emissivity spectrum at Dunhuang calibration site of China[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(5): 1213. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)05-1213-05
- [14] 张勇, 戎志国, 闵敏. 中国遥感卫星辐射校正场热红外通道在轨辐射定标方法精度评估[J]. 地球科学进展, 2016, 31(2): 171
ZHANG Yong, RONG Zhiguo, MIN Min. Accuracy evaluation of the CRCS in-orbit field radiometric calibration methods for thermal infrared channels[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(2): 171. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)05-1213-05
- [15] 董毅, 吕佳彦, 宋青涛. 反射率基法辐射定标原理和流程介绍[J]. 科技创新与应用, 2016, 24: 71
DONG Yi, LÜ Jiayan, SONG Qintao. Introduction to the principle and process of reflectivity basic radiation calibration technology innovation and application[J]. Technological Innovation and Application, 2016, 24: 71

(编辑 张 红)