

基于MODIS的GF-4/PMS遥感器交叉定标——以巴丹吉林沙漠为参考目标

张浩¹, 刘涛^{1,2}, 闫东川³, 阎跃观⁴, 崔珍珍^{1,5}

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
2. 中科星图空间技术有限公司, 西安 710100;
3. 中国冶金地质总局矿产资源研究院, 北京 101300;
4. 中国矿业大学(北京), 北京 100083;
5. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 焦作 454003

摘要: 高分四号(GF-4)是中国首颗高分辨率静止轨道光学遥感卫星, 搭载了一台可见/中波红外凝视相机, 由于缺少星上定标系统导致无法提供高频次的星上辐射定标系数。为了更好的实现GF-4/PMS传感器辐射性能监测和数据量化应用, 本文选择了巴丹吉林沙漠南端均匀沙地, 利用MODIS作为参考传感器对GF-4/PMS可见近红外波段进行交叉定标。为尽量减少地表不均匀性造成的交叉定标误差, 使用较高分辨率的影像(Landsat 8/OLI)搜索巴丹吉林沙漠地区的均匀区域, 确定为交叉定标试验区。为进一步减少遥感器成像角度和大气变化的影响, 进行了MODIS成像角与GF-4成像角角度差约束(小于 20°)、成像时刻约束(小于2 h)、云和成像质量问题, 共选择2016年—2018年有效图像对13组, 通过利用MODTRAN模拟计算二者光谱匹配因子进而实现交叉定标系数计算。结果表明:(1) 本文计算的辐射定标系数在朗伯体假定和Ross-Li模型假定情况下具有较高一致性, 忽略BRDF效应情况造成的计算误差在0.8%—4%, 定标结果的不确定度在7.4%以内;(2) 2016年至2018年GF-4/PMS遥感器辐射性能呈现缓慢下降特征, 年衰减率小于1%。本文的方法可以有效地提高GF-4/PMS的辐射定标频率和定标精度, 实现对GF-4/PMS传感器整个生命周期的辐射性能监测。

关键词: 遥感, 交叉定标, GF-4/PMS, MODIS, 不确定性分析

中图分类号: P2

引用格式: 张浩, 刘涛, 闫东川, 阎跃观, 崔珍珍. 2023. 基于MODIS的GF-4/PMS遥感器交叉定标——以巴丹吉林沙漠为参考目标. 遥感学报, 27(5): 1205-1215

Zhang H, Liu T, Yan D C, Yan Y G and Cui Z Z. 2023. Cross calibration of GF-4/PMS based on MODIS over Badain Jaran Desert. National Remote Sensing Bulletin, 27(5): 1205-1215[DOI:10.11834/jrs.20221774]

1 引言

高分四号(GF-4)卫星于2015年12月29日在西昌卫星发射中心发射成功, 是中国第一颗地球同步轨道遥感卫星, 搭载了一台可见光50 m/中波红外400 m分辨率、大于400 km幅宽的凝视相机, 采用面阵凝视方式成像, 具备可见光、多光谱和红外成像能力, 设计寿命8 a, 重访周期达20 s, 通过指向控制, 实现对中国及周边地区的观测。

GF-4为减灾、林业、地震和气象等各种应用

提供快速、可靠、稳定的光学遥感数据, 为灾害风险预报、森林火灾监测、地震构造信息增添新的技术方法, 在灾害监测等方面具有巨大的潜力和广阔的应用空间(聂娟等, 2018; 张磊, 2018; 吴玮, 2019)。遗憾的是GF-4没有星上定标系统, 传感器的定标完全依赖于场地定标, 而场地定标受限于场地、设备、成本等因素, 无法满足高频率定标需求, 这限制了它的应用(高海亮等, 2010; Zhang等, 2018)。交叉定标是利用定标精度较高的传感器来标定待标定的卫星传感器的方

收稿日期: 2021-12-03; 预印本: 2022-05-10

基金项目: 海南省重大科技计划(编号:ZDKJ2019006); 国家自然科学基金(编号:41771397)

第一作者简介: 张浩, 研究方向为光学遥感辐射定标及大气校正。E-mail: zhanghao612@radi.ac.cn

通信作者简介: 闫东川, 研究方向为海量遥感数据智能化处理与分析。E-mail: yandc@radi.ac.cn

法, 该方法不需要高成本的野外同步试验, 也不需要很精确的大气参数测量; 同时交叉定标方法可以对历史数据进行标定, 是目前最具有广泛应用前景的定标方法之一(赵维宁等, 2015)。

基于交叉定标的优势, 国内外学者先后将交叉定标方法应用于NOAA、BJ-1、HJ-1、GF-1等卫星遥感器。Teillet等(1990)基于美国White Sands场, 针对NOAA-10/AVHRR, 利用Landsat 5和SPOT/HVR影像, 进行了AVHRR的交叉定标。Teillet等(2007)分析了不同地物光谱对交叉定标光谱匹配因子的影响, 得出利用Railroad试验场交叉定标精度优于利用草地交叉定标。Rao等(2001)基于Sonoran沙漠试验场, 以NOAA-14/AVHRR为参考传感器, 对GOES-8传感器进行交叉定标。Cao等(2005)提出SNO(Simultaneous Nadir Overpass)交叉定标方法, 该方法利用极地地区的卫星影像对完成了NOAA系列极轨卫星15、16、17号搭载的HIRS传感器之间的相互交叉定标。杨忠东等(2004)使用Landsat 7/ETM+为参考传感器, 通过辐射传输模拟和统计分析, 实现了对CBERS-01(中巴地球资源卫星)CCD相机的交叉定标。陈正超等(2008)等在缺少光谱响应函数的情况下, 利用SPOT4/HRVIR2、Landsat 5/TM和Terra/MODIS这3种传感器对北京一号小卫星进行交叉辐射定标, 得到比较可信的定标系数。马晓红(2011)选取阿拉伯沙漠作为定标试验场, 以MODIS为参考传感器对HJ-1/CCD相机进行交叉辐射定标, 结果表明交叉辐射定标的系数具有较高的精度。Zhong等(2014)和Yang等(2015, 2017)选取巴丹吉林沙漠, 基于分辨率较高的Landsat 7/ETM+、Landsat 8/OL和DEM数据构建地表BRDF模型, 实现对HJ-1/CCD、GF-1/WFV和GF-4/PMS的交叉辐射定标。张玉环等(2016)基于反射率低、中、高(植被区、沙漠和雪)场景, 使用MODIS作为参考传感器对GOCI进行交叉辐射定标。Chen等(2017)将交叉辐射定标作为最优逼近问题, 以Landsat 8/OLI作为参考传感器, 采用SCE-UA算法, 通过迭代方程找到最优定标系数和BRDF调整因子, 结果表明交叉辐射定标系数计算的地表反射率误差小于5%。

为减少观测角度差异造成的定标误差, 通常交叉定标选取两个传感器观测角较小且较为接近的影像进行交叉定标。GF-4/PMS具有较宽的视

角, 由于纬度原因在中国的大部分地区都有较大的观测角, 这对GF-4/PMS交叉定标带来较大困难。本文通过影像搜索巴丹吉林沙漠均匀场地作为交叉定标试验场, 以MODIS传感器为参考, 利用MODTRAN辐射传输模型, 在约束MODIS与GF-4成像角度差异和二者过境时间差异条件下, 对GF-4/PMS时序数据进行交叉定标, 获取时序的交叉定标系数, 实现对GF-4/PMS传感器性能的时序监测和评估。

2 研究方法

本文通过较高分辨率影像(Landsat 8/OLI)数据搜索均匀区域对大角度观测的中高分辨率数据(GF-4/PMS)与Terra(Aqua)/MODIS数据进行交叉定标。首先, 使用几何和辐射校准较好的Landsat 8/OLI数据寻找合适的均匀区域作为定标试验场; 然后, 根据选取的试验场选取MODIS和GF-4/PMS时间序列数据; 接着, 时序数据筛选, 除去云和成像质量较差的数据后, 利用如下3个条件进一步筛选: (1) 550 nm气溶胶光学厚度小于0.3; (2) MODIS成像散射角度(观测方向和太阳入射方向夹角)和GF-4成像散射角度差异小于 20° ; (3) MODIS和GF-4成像时刻小于2 h; 最后, 对时间序列数据进行预处理, 提取试验场时间序列数据的观测几何等信息, 使用辐射传输模型计算MODIS和GF-4/PMS模拟的表观辐亮度, 计算光谱匹配因子; 最后对GF-4/PMS进行交叉定标, 总体流程如图1所示。

2.1 定标原理

交叉定标是利用定标精度较高的传感器作为参考, 对待定标的传感器进行定标; 其原理是选取对同一目标成像的同步或近似同步的影像对, 在分析两个传感器光谱响应、观测几何、大气参数等匹配的基础上, 建立两个传感器图像数字计数值之间的关系, 利用参考传感器已知的辐射定标系数求解待标定传感器的定标系数(高海亮等, 2010; 吕文博, 2014)。通常情况下, 卫星遥感器DN值与入瞳辐亮度存在线性关系:

$$L = gain \cdot DN + offset \quad (1)$$

式中, *gain*和*offset*分别是定标系数的增益和截距, *L*表示传感器的入瞳辐亮度, *DN*表示图像的数字计数值。

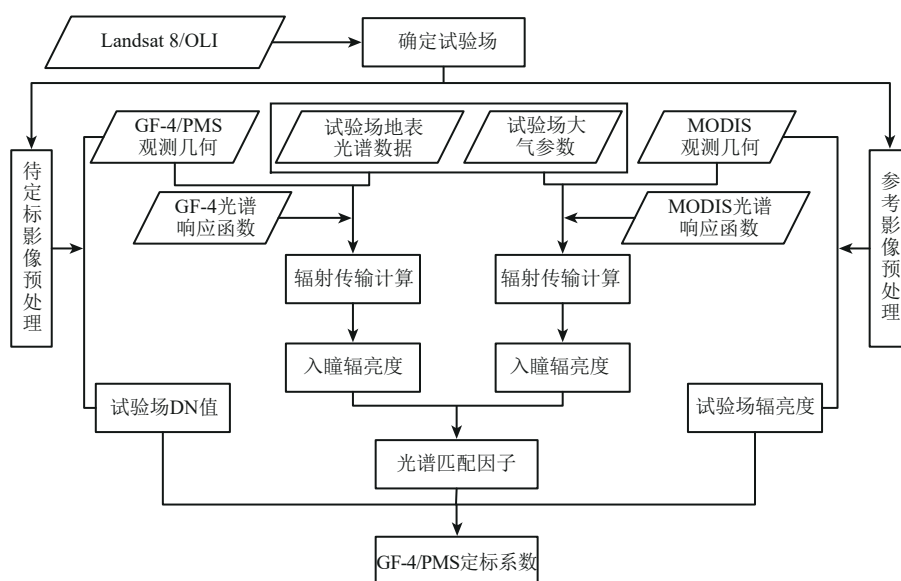


图1 交叉定标流程

Fig. 1 The calculation flow of cross calibration

通过两个传感器的光谱匹配因子，计算得到待标定传感器的表观辐亮度的模拟值：

$$L_{PMS}^* = Q \cdot L_{MODIS} \quad (2)$$

式中， L_{PMS}^* 为通过光谱匹配因子和MODIS入瞳辐亮度计算的GF-4/PMS的入瞳辐亮度， L_{MODIS} 为从传感器测量得到的MODIS入瞳辐亮度， Q 为两个传感器的光谱匹配因子，光谱匹配因子可有下式计算：

$$Q = \frac{L_{PMS}^{simu}(\theta_{s-PMS}, \theta_{v-PMS}, \varphi_{PMS})}{L_{MODIS}^{simu}(\theta_{s-MODIS}, \theta_{v-MODIS}, \varphi_{MODIS})} \quad (3)$$

式中， L_{PMS}^{simu} 、 L_{MODIS}^{simu} 分别为MODTRAN模拟的PMS和MODIS各波段在实际成像角度下的入瞳辐亮度，式中， θ_{s-PMS} 、 θ_{v-PMS} 、 φ_{PMS} 分别对应GF-4的太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角， $\theta_{s-MODIS}$ 、 $\theta_{v-MODIS}$ 、 φ_{MODIS} 分别对应MODIS的太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角。利用式(2)获得待标定传感器的辐亮度之后，便可结合待标定影像的DN值，通过式(4)拟合计算待标定传感器的定标系数，实现待标定传感器的标定。

$$L_{PMS}^* = gain^* \cdot DN_{PMS} + offset^* \quad (4)$$

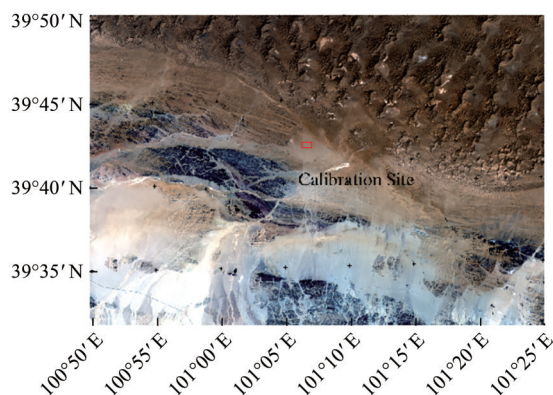
2.2 试验场

为了选取合适的实验场，本文使用巴丹吉林沙漠地区无云的Landsat 8/OLI影像，位置如图2所示，搜索DN值的均值和方差最小的500 m×500 m大小区域作为试验场，最终选取了巴丹吉林沙漠南部边缘的500 m×500 m的均匀区域(图2)，图2(a)为试验场的位置，其中右侧部分为Landsat 8/OLI真彩色图像；图2(b)为GF-4/PMS影像上试验场

的位置；图2(c)为Landsat 8/OLI影像上试验场的位置。本文选取目标试验场主要考虑以下几点：(1)巴丹吉林沙漠随时间在亮度、空间均匀性、季节变化、长时期的稳定，且地表主要地物为沙子(Yang等, 2017)，符合作为交叉定标试验场的条件(Scott等, 1996)；(2)马晓红等使用影像从阿拉伯沙漠选取均匀场地实现了对环境星的交叉定标(马晓红, 2011)，结果表明使用影像搜索沙漠地区均匀区域作为交叉辐射定标的试验场是可行的且有较高的精度；(3)在此区域能够获取一定数量连续的影像对数据，可实现时序交叉定标。

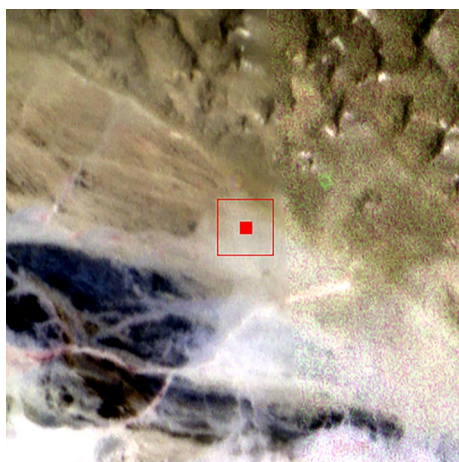
2.3 数据

交叉辐射定标的精度依赖于参考传感器的精度，搭载在EOS-Terra/Aqua上的MODIS传感器，配备星上太阳辐射校正系统，绝对定标系数不确定度在3%左右(Chang等, 2017)；另外MODIS传感器重访周期短，覆盖范围广、拥有丰富的数据的特点使得其经常被用来作为参考传感器对其他卫星传感器进行交叉定标研究。HJ-1/CCD、CBERS-02/CCD、北京一号小卫星、NOAA-16、GOCI、ETM+等都以MODIS为参考传感器进行过交叉定标研究(Hu等, 2001；李小英等, 2005；Vermote和Saleous, 2006；陈正超等, 2008；马晓红, 2011；张玉环等, 2016)。考虑稳定的辐射性能、较高的辐射定标精度和丰富的数据，因此本文选择MODIS作为参考传感器对GF-4/PMS进行交叉辐射定标研究。

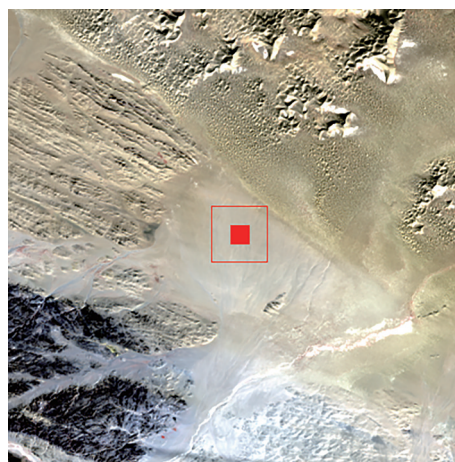


(a) 试验场位置

(a) Calibration site



(b) GF-4/PMS



(c) Landsat 8/OLI

图2 试验场的位置及试验场影像

Fig. 2 The location and images of calibration site

2.4 光谱匹配

在对 GF-4/PMS 进行交叉定前需要考虑与参考传感器 (MODIS) 光谱响应函数 (SRF) 的差异, 图 3 绘制了 GF-4/PMS 和 MODIS 可见光和近红外波段的光谱响应函数。其中, MODIS 的光谱响应函数和波段大气层顶太阳辐照度数据来自 NASA 官网 MCST 团队 (<https://mcst.gsfc.nasa.gov/calibration/parameters>[2021-12-03]), GF-4/PMS 的光谱响应函数和波段大气层顶太阳辐照度数据来自中国资源卫星中心 (<http://www.cresda.com/CN/Downloads/dbcs/>[2021-12-03]), 二者在可见光和近红外波段的波段信息如表 1 所示。将影像中提取的试验场观测几何和地表反射光谱等信息输入到辐射传输模型 MODTRAN 中, 计算出两个传感器模拟的表现

观亮度, 得到两个传感器表现观亮度的光谱匹配因子。为评估地表二向性的影响, 也同时利用 Ross-Li 模型进行计算了光谱匹配因子 (Li 和 Strahler, 1992), 相关输入参数来自于 MCD43 产品 (Schaaf 等, 2011), 对应如下形式:

$$R(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda) = f_{\text{iso}}(\lambda) + f_{\text{vol}}(\lambda)K_{\text{vol}}(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda) + f_{\text{geo}}(\lambda)K_{\text{geo}}(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda) \quad (5)$$

式中, $f_{\text{iso}}(\lambda)$ 、 $f_{\text{vol}}(\lambda)$ 与 $f_{\text{geo}}(\lambda)$ 分别为各向同性散射、体散射与几何光学散射对应的权重系数, K_{vol} 与 K_{geo} 分别为体散射核与几何光核。MCD43 A1 产品提供了 1—7 个波段的 $f_{\text{iso}}(\lambda)$ 、 $f_{\text{vol}}(\lambda)$ 与 $f_{\text{geo}}(\lambda)$, 按照 MODIS 3、4、1、2 波段与 GF-4/PMS 的 2—5 波段对应关系从 MCD43 A1 提取权重因子, 然后按照 MODTRAN 运行要求输入对应参数, 利用式 (3) 计算光谱匹配因子。

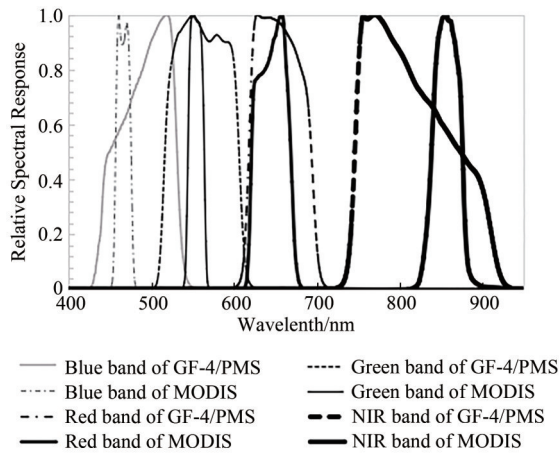


图3 GF-4/PMS和MODIS光谱响应曲线

Fig. 3 The Spectral response function for the corresponding channels of the GF-4/PM and MODIS

表1 GF-4/PMS和MODIS波段范围

Table 1 The spectral range of GF-4/PMS and MODIS

GF-4/PMS		MODIS	
波段号	波段范围/nm	波段号	波段范围/nm
Band 2	450—520	Band 3	433—453
Band 3	520—600	Band 4	525—600
Band 4	630—690	Band 1	630—680
Band 5	760—900	Band 2	845—885

其中，光谱匹配因子计算使用的地面光谱数据来自(Yang等, 2017) 2012年7月在巴丹吉林沙漠地区实测，光谱曲线如图4所示；根据(Lacherade等, 2013)的研究，在缺少可靠数据的情况下沙

表2 选择的GF-4和MODIS影像对的信息

Table 2 Information of selected GF-4/PMS and MODIS image pairs

成像日期	成像时间(北京时间)		成像 时间差/min	观测天顶角		太阳天顶角		相对方位角		成像散射 角度差*
	GF-4	MODIS		GF-4	MODIS	GF-4	MODIS	GF-4	MODIS	
2016-06-02	12:16	13:05	46	43.36	57.62	21.31	27.93	-31.15	27.13	7.37
2016-09-02	11:30	11:55	25	43.00	31.87	39.55	36.62	-36.04	47.27	2.66
2016-09-25	11:00	12:00	60	43.02	22.53	49.82	43.42	-36.09	55.68	8.22
2016-10-04	9:51	11:50	119	43.02	32.06	62.43	46.99	-49.75	57.65	4.98
2017-06-11	11:24	12:30	66	43.63	31.33	28.57	19.01	-56.52	-134.93	11.39
2017-08-12	13:03	14:20	77	44.58	0.82	25.00	28.33	-1.72	136.62	9.33
2017-08-13	14:05	15:05	60	44.59	57.58	26.90	34.13	32.65	-35.99	8.70
2017-09-16	11:30	11:35	5	46.96	52.73	43.33	42.77	-28.52	48.93	16.49
2018-03-23	12:11	12:00	11	43.18	22.62	42.04	42.90	-19.01	50.26	19.59
2018-05-30	11:32	11:35	3	47.01	52.31	27.84	27.10	-47.74	29.53	2.71
2018-05-30	14:01	14:50	49	43.82	46.70	20.80	28.05	42.08	-26.47	6.75
2018-08-25	11:31	11:40	9	46.95	46.14	37.23	35.64	-37.33	41.37	2.07
2018-09-10	12:00	11:40	20	46.97	46.24	38.31	40.11	-20.87	47.77	16.19

注：*：成像散射角是指太阳入射方向 (θ_s, φ_s) 到观测方向 (θ_v, φ_v) 的角度 θ (即 $\cos(\theta) = -\cos(\theta_s) \cdot \cos(\theta_v) - \cos(\varphi_s - \varphi_v) \cdot \sin(\theta_s) \cdot \sin(\theta_v)$)，GF-4和MODIS成像散射角差异反映了二者观测几何的相似程度。

漠地区 550 nm 气溶胶光学厚度可以采用默认值 0.2，其余相关的大气参数使用 MODTRAN 模型的默认参数，由参数假设带来光谱配因子的计算误差分析见 4.1 节。为尽可能减少误差，这里气溶胶光学厚度数据采用了 MAIAC 算法生产的 MCD19 产品 (Lyapustin 等, 2021)。

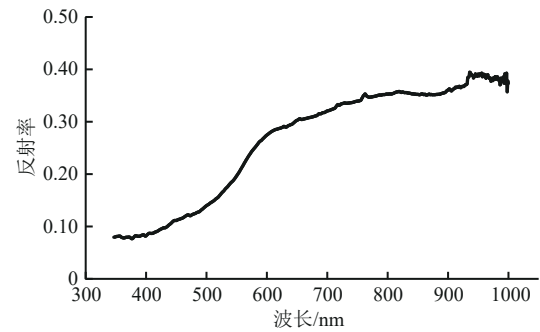


图4 巴丹吉林沙漠地面光谱曲线(Yang等,2017)

Fig. 4 The spectral curve of Badain Jaran desert (Yang et al., 2017)

3 数据处理

(1) 数据。为获取尽量多的数据，选择 MODIS 和 GF-4 在试验区域同日过境的无云、清晰的影像对，在大气、成像角度和成像时刻约束下选取了 2016 年 5 月至 2018 年 9 月过境的 13 对 GF-4 和 MODIS 影像作为本次交叉定标的的数据，各影像对的成像时间、时间差、试验场位置的成像几何和成像散射角度差异信息如表 2 所示。

(2) 影像对处理。在选取定标试验场之后 GF-4 影像处理步骤：(1) 使用 ENVI 进行正射校正，裁剪出实验区域 2397×1955 大小（对应 Landsat 8/OLI：3000×2000 大小）；(2) 使用 Landsat 8/OLI 影像为基准对 GF-4/PMS 影像进行几何配准，配准精度优于 1 个像素；(3) 提取 GF-4/PMS 试验场的观测几何信息（观测天顶角、观测方位角、太阳天顶角和太阳方位角）及各波段的 DN 值。MODIS 影像的处理步骤：(1) 使用 ENVI 进行几何校正；(2) 提取 MODIS 和 GF-4 在试验场位置的观测几何以及各波段的 DN 值；(3) 根据交叉定标区域位置提取 MCD19A2 中气溶胶光学厚度、MCD43A1 中 BRDF 数值，其中 MCD43A1 数值只采用 MCD43A2 中质量标记为 0 或者 1 的数值。将提取的观测及大气参数等信息输入 MODTRAN 辐射传输模型，计算出 GF-4/PMS 和 MODIS 各波段的模拟的表观辐亮度（TOA），求得参考传感器与待标定传感器的光谱匹配因子。利用光谱匹配因子和 MODIS 观测得到的表观辐亮度计算出 GF-4/PMS 模拟的入瞳辐亮度；将 GF-4/PMS 的 DN 值与模拟出的入瞳辐亮度进行线性拟合，得到交叉辐射定标系数。为进行 BRDF 效应的对比分析，分别基于实测光谱的朗伯体假设情况和基于 MCD43 产品的 BRDF 模型情况两种方式计算光谱匹配因子。

4 结果

4.1 实验结果与分析

本文得到的朗伯体假设和 BRDF 模型计算的 GF-4/PMS 交叉辐射定标系数如表 3 所示，中国资源卫星应用中心公布的 2016 年—2018 年场地定标系数见表 4。为了更直观的分析交叉定标结果，本文绘制了朗伯体假设和 BRDF 模型两种情况下计算的交叉定标系数和中国资源卫星应用对比散点图（图 5），其中虚线代表交叉定标系数随时间的变化趋势。结果表明：(1) 由于限定了过境时间差和成像角度差，朗伯体假设和 BRDF 模型假设条件下计算的交叉定标系数具有较高一致性，绿、蓝、红和近红外波段二者的相对差异分别为 $3.86\pm 2.36\%$ 、 $3.36\pm 1.87\%$ 、 $3.88\pm 2.21\%$ 和 $3.89\pm 2.00\%$ ；(2) 2016 年—2018 年间 GF-4/PMS4 各个波段的定标系数整体呈现缓慢增加趋势，表明传感器辐射性能出现下降趋势，朗伯体假设和 BRDF 模型假设

条件下 4 个波段的年衰减率分别为 1.00%、0.69%、0.43%、0.28% 和 0.90%、0.39%、0.18%、0.06%；(3) 每年 8—10 月附近交叉定标结果平均值与中国资源卫星应用中心场地定标公布的定标系数的相对误差，2017 年偏差明显（超过 9%），这一方面可能与遥感器的辐射稳定性有关，另一方面与单次定标出现的随机误差有关（Chen 等，2014）；(4) 相比朗伯体假定条件下计算的交叉定标系数，BRDF 模型假定下计算结果与场地定标系数偏差略高，这可能与后者采用朗伯体假定计算的定标方法有关，该问题需要后续更多场地实测 BRDF 支持情况下进一步验证。

从图 5 中进一步发现 2018 年 5 月 30 日两幅 GF-4 分别与 MODIS Terra 和 Aqua 进行交叉定标，二者在 4 个波段差异小于 6%，说明本文方法具有较高精度。为进一步检验该结果，我们放宽角度和成像时间差的差异，发现同一天 GF-4 对 MODIS 不同时刻交叉定标的结果保持了较好的一致性，相对误差均小于 6%（如表 5）。

4.2 不确定性分析

通过对 GF-4/PMS 与 Terra (Aqua) /MODIS 的交叉定标过程分析，影响定标精度的因素主要有以下几方面：(a) MODIS 自身定标的不确定性；(b) 影像空间配准带来的影响；(c) 大气参数误差的影响；(d) 地表反射光谱的误差；(e) 大气辐射传输模型本身计算的不确定性；(f) 地表二向性的不确定性；(g) 其他因素引起的误差。

(1) MODIS 定标系数的不确定性为 $\pm 3\%$ （Chang 等，2017）。巩慧等（2010）用 2007 年二连浩特对 MODIS 的同步实验数据，采用反射率基法对 MODIS 进行了辐射定标和真实性检验研究，证明了 MODIS 具有较高的定标精度。

(2) 为了分析空间像元匹配误差对交叉定标结果的影响，本文将所有选用影像的试验场扩大一倍（1050 m×1050 m）的平均 DN 值与试验场的平均 DN 值做比较最大差异分别为：蓝波段 0.28%、绿波段 0.24%、红波段 0.4% 和近红外波段 0.19%。因此，即使几何配准误差在 1 个像素甚至更多像元情况下，DN 值的差异也很小。

(3) 大气条件对光谱匹配因子的计算的影响主要为：气溶胶类型、气溶胶光学厚度和水汽含量。由于本文交叉定标缺乏同步测量数据，我们

使用MODTRAN中所提供的标准大气成分组成，550 nm气溶胶光学厚度设置为0.2。在其他变量不变的情况下，分别改变气溶胶类型（沙漠型、乡村型和城市型）、550 nm气溶胶光学厚度（0.05至0.4）和水汽含量（0.4至4.0）的值计算光谱匹配

因子的差异，计算结果如表5所示；图6列出了2016年8月25日不同条件对光谱匹配因子的影响；从表5和图6(b)中均可看出水汽含量对近红外波段光谱匹配因子的影响较大。

表3 两种情况的交叉定标结果

Table 3 Cross calibration results for two cases

影像日期	朗伯体假定情况的交叉定标系数				BRDF假定情况下的交叉定标系数			
	Band1	Band2	Band3	Band4	Band1	Band2	Band3	Band4
2016-06-02	0.1794	0.2053	0.1780	0.1335	0.1796	0.1937	0.1722	0.1260
2016-09-02	0.1778	0.1926	0.1596	0.1172	0.1890	0.1975	0.1685	0.1211
2016-09-25	0.1843	0.1953	0.1597	0.1186	0.1973	0.2038	0.1730	0.1266
2016-10-04	0.1895	0.1967	0.1607	0.1193	0.2002	0.2025	0.1710	0.1249
2017-06-11	0.1810	0.2010	0.1649	0.1227	0.1957	0.2110	0.1782	0.1301
2017-08-12	0.1847	0.1998	0.1682	0.1221	0.1978	0.2055	0.1785	0.1261
2017-08-13	0.1929	0.2209	0.1881	0.1376	0.1931	0.2089	0.1835	0.1289
2017-09-16	0.1964	0.2050	0.1644	0.1233	0.2013	0.2002	0.1655	0.1204
2018-03-23	0.1944	0.1984	0.1590	0.1201	0.2046	0.2001	0.1674	0.1242
2018-05-30	0.2097	0.2172	0.1826	0.1325	0.2139	0.2085	0.1795	0.1269
2018-05-30	0.1995	0.2231	0.1822	0.1401	0.2031	0.2130	0.1781	0.1333
2018-08-25	0.1994	0.2054	0.1701	0.1245	0.2069	0.2023	0.1720	0.1232
2018-09-10	0.1997	0.2099	0.1727	0.1242	0.2073	0.2087	0.1768	0.1247

表4 资源卫星中心公布的定标系数

Table 4 Radiometric calibration coefficients from CRESDA

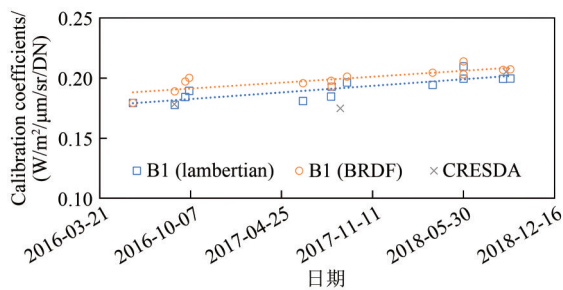
定标年份*	Band1	Band2	Band3	Band4
2016	0.1784	0.1878	0.1515	0.108
2017	0.1749	0.1903	0.1532	0.1073
2018	0.2053	0.2209	0.1664	0.115

注：*表示中国资源卫星应用中心场地辐射定标工作一般在每年9月份前后。

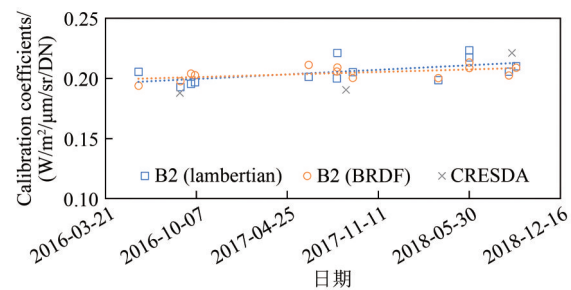
(4) 本文所使用的地面光谱为巴丹吉林沙漠中心地带的光谱曲线，并非试验场实测的光谱，为了分析误差我们使用敦煌定标场的地面光谱来

计算光谱匹配因子，分析在没有实测光谱的情况下，使用同类地物光谱替代对交叉定标结果所带来的影响；4个波段计算的光谱匹配因子差异分别为：5.04%、4.02%、0.02%和2.94%，说明使用同类地物光谱计算光谱匹配因子进行交叉定标在可接受的范围之内；本文所使用的验证地物的光谱曲线如图7所示。

(5) 前面对比了采用朗伯体假定和 Ross-Li BRDF模型假定得到交叉定标差异，蓝、绿、红、近红外波段的相对差异为 $3.86\pm 2.36\%$ 、 $3.36\pm 1.87\%$ 、 $3.88\pm 2.21\%$ 和 $3.89\pm 2.00\%$ 。



(a) 蓝波段
(a) Blue band



(b) 绿波段
(b) Green band

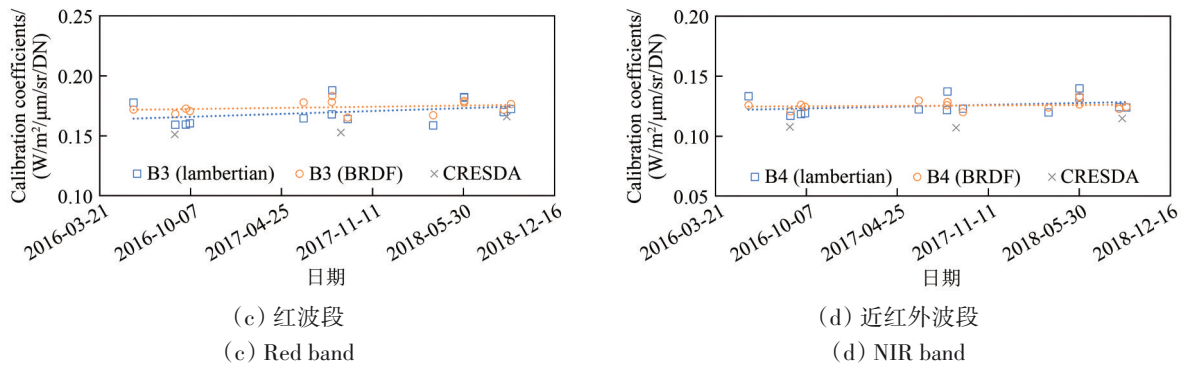


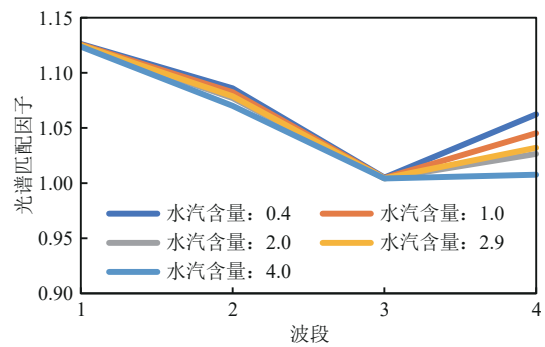
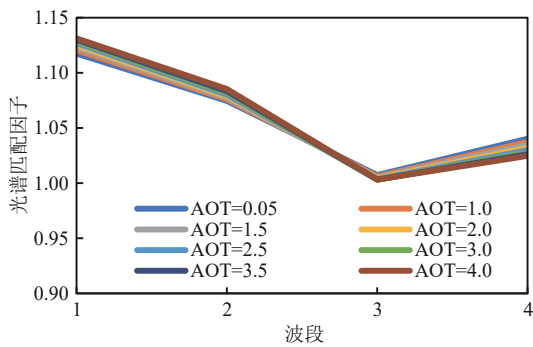
图5 交叉定标系数及与中国资源卫星应用中心系数对比(Lambertian代表在朗伯体假定条件下的计算结果;BRDF代表采用 Ross-Li 模型的计算结果;CRESDA 代表中国资源卫星应用中心的结果)

Fig. 5 The comparison between the cross calibration coefficients and the calibration coefficient of China Center for Resources Satellite Data and Application (Lambertian denotes the results of cross calibration methods; BRDF denotes the results of Ross-Li BRDF model; and CRESDA denotes the results of China Center for Resources Satellite Data and Application)

表5 同一天多组交叉定标系数对比

Table 5 Cross calibration coefficients comparison in the same day

日期	成像时刻		朗伯体假定情况的交叉定标系数				BRDF 假定情况下的交叉定标系数			
	GF-4	MODIS	Band1	Band2	Band3	Band4	Band1	Band2	Band3	Band4
2017-06-11	11:24	12:30	0.1810	0.2010	0.1649	0.1227	0.1957	0.2110	0.1782	0.1301
2017-06-11	11:24	14:10	0.1823	0.1988	0.1648	0.1217	0.1975	0.2087	0.1779	0.1286
2017-08-12	13:03	12:20	0.1734	0.1936	0.1608	0.1195	0.1870	0.2041	0.1763	0.1282
2017-08-12	13:03	14:20	0.1847	0.1998	0.1682	0.1221	0.1978	0.2055	0.1785	0.1261
2017-08-13	14:05	11:45	0.1943	0.2139	0.1809	0.1333	0.1985	0.2075	0.1809	0.1283
2017-08-13	14:05	15:05	0.1929	0.2209	0.1881	0.1376	0.1931	0.2089	0.1835	0.1289
2018-03-23	12:11	12:00	0.1944	0.1984	0.1590	0.1201	0.2046	0.2001	0.1674	0.1242
2018-03-23	12:11	13:40	0.1854	0.1979	0.1626	0.1213	0.1952	0.2012	0.1726	0.1271
2018-05-30	11:32	11:35	0.2097	0.2172	0.1826	0.1325	0.2139	0.2085	0.1795	0.1269
2018-05-30	11:32	14:50	0.2041	0.2150	0.1807	0.1302	0.2088	0.2072	0.1784	0.1251
2018-05-30	14:01	11:35	0.2050	0.2254	0.1840	0.1425	0.2080	0.2143	0.1792	0.1352
2018-05-30	14:01	14:50	0.1995	0.2231	0.1822	0.1401	0.2031	0.2130	0.1781	0.1333
2018-08-25	11:31	11:40	0.1994	0.2054	0.1701	0.1245	0.2069	0.2023	0.1720	0.1232
2018-08-25	11:31	15:00	0.1978	0.2094	0.1753	0.1275	0.2023	0.2014	0.1728	0.1227
2018-09-10	12:00	11:40	0.1997	0.2099	0.1727	0.1242	0.2073	0.2087	0.1768	0.1247
2018-09-10	12:00	15:00	0.2024	0.2176	0.1793	0.1290	0.2073	0.2111	0.1784	0.1254



(a) 550 nm 气溶胶光学厚度
(a) Aerosol optical thickness at 550 nm

(b) 水汽
(b) Water vapor

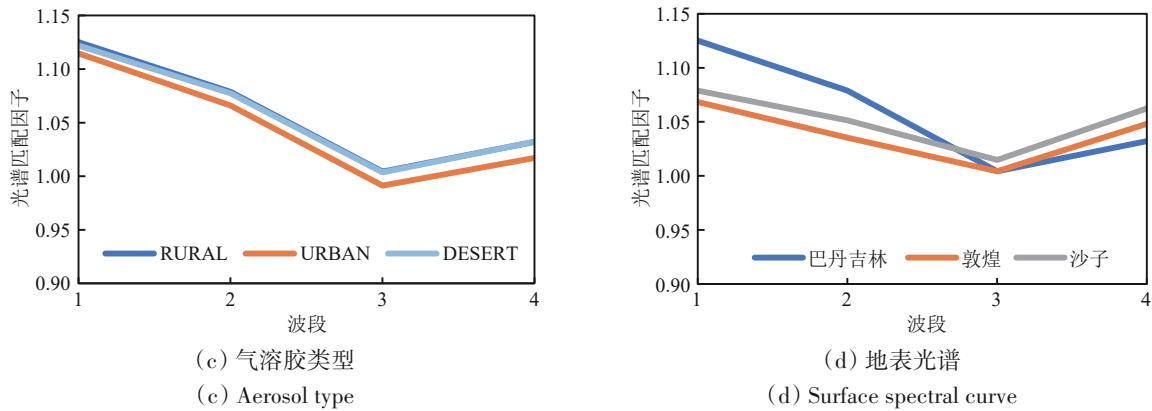


图6 不同条件对光谱匹配因子的影响

Fig. 6 The impact of difference factors on spectral matching factor

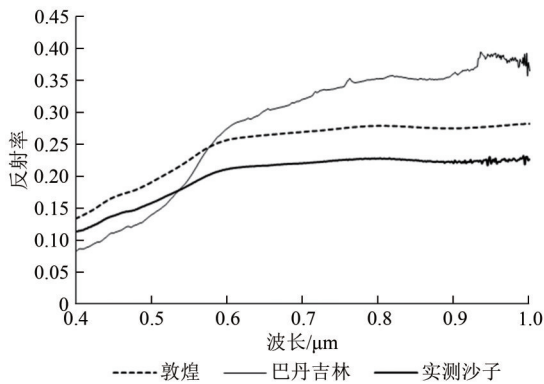


Fig. 7 Alternative spectral curves

综合上述分析,通过对GF-4/PMS与MODIS交叉定标误差来源分析,得到此次交叉定标总的 uncertainty 如表6所示,总体误差在7.4%以内,高于垂直观测卫星的交叉定标误差估算结果(Chen等,2014)。

表6 交叉定标结果不确定性分析

Table 6 Uncertainty analysis for cross calibration results

误差来源	蓝	绿	红	近红外
MODIS 定标系数/1%	3.00	3.00	3.00	3.00
MODTRAN 精度/1%	2.00	2.00	2.00	2.00
像元几何配准误差/1%	0.28	0.24	0.40	0.19
气溶胶类型/1%	0.28	0.13	0.07	0.14
气溶胶光学厚度/1%	0.69	0.60	0.30	0.80
水汽含量/1%	0.12	0.81	0.07	2.93
地表光谱替代/1%	5.04	4.02	0.02	2.94
地表二向性误差/1%	3.86	3.36	3.88	3.89
其他不确定因素/1%	1.00	1.00	1.00	1.00
总的 uncertainty/1%	7.41	6.52	5.41	6.86

5 结论

受到太空环境、遥感器自身光电性能下降等

因素的影响,遥感器辐射性能不可避免发生变化,因此,一年一次的场地定标频次难以监测遥感器性能的变化情况,无法满足卫星传感器数据长期量化的需求。本文以辐射定标精度较高的MODIS为参考传感器,对2016年—2018年GF-4/PMS可见光近红外波段进行时序定标,为GF-4/PMS长期辐射性能评估和监测提供一种技术手段。结果表明:

(1) GF-4在中国区域具有较大观测角度,通过约束与MODIS成像角度差异和成像时间差异,能较好减少因为大气变化和BRDF差异带来的影响,忽略和考虑沙地BRDF效应带来的差异约4%,两种情况下得到的交叉定标系数具有较高的一致性,定标 uncertainty 小于7.4%。

(2) 与中国资源卫星中心的场地定标系数相比,2016年和2018年交叉定标结果与场地定标系数较为接近,但2017年偏离较大,这可能与场地定标朗伯体假定、交叉定标自身 uncertainty 有关。

(3) 高频次的交叉定标能够有效检查单次定标可能存在的误差,通过交叉定标和场地定标结果相互检查能够剔除存在的粗差点,提高结果的可靠性。

(4) 通过时序的交叉定标,我们发现GF-4/PMS各个波段的辐射性能从2016年—2018年呈现缓慢下降趋势,年衰减率小于1%。

由于GF-4卫星静止轨道特征,与极轨卫星有更多交叉成像机会,在约束成像角度和时间情况下,继续监测GF-4的辐射性能变化情况。

志 谢 本文所使用的巴丹吉林沙漠的地表

实测光谱曲线由中国科学院空天信息研究院的杨爱霞博士提供, 在此表示衷心的感谢; 感谢中国资源卫星中心提供了大量的GF-4数据; 感谢匿名审稿人细致的评审。

参考文献(References)

- Cao C Y, Xu H, Sullivan J, McMillin L, Ciren P and Hou Y T. 2005. Intersatellite radiance biases for the High-Resolution Infrared Radiation Sounders (HIRS) on board *NOAA-15*, -16, and -17 from simultaneous nadir observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22(4): 381-395 [DOI: 10.1175/JTECH1713.1]
- Chang T J, Xiong X X, Angal A, Wu A S and Geng X. 2017. Aqua and terra MODIS RSB calibration comparison using BRDF modeled reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(4): 2288-2298 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2641258]
- Chen Y P, Sun K M, Li D R, Bai T and Huang C Q. 2017. Radiometric cross-calibration of GF-4 PMS sensor based on assimilation of landsat-8 OLI images. *Remote Sensing*, 9(8): 811 [DOI: 10.3390/rs9080811]
- Chen Z C, Liu X, Li J S, Luo W F, Zhang L, Zhang H, Zhang X and Zhang B. 2008. The cross calibration of Beijing-1 microsatellite multispectral sensors. *Journal of Astronautics*, 29(2): 637-643 (陈正超, 刘翔, 李俊生, 罗文斐, 张靓, 张浩, 张霞, 张兵. 2008. 北京一号小卫星多光谱传感器交叉定标. *宇航学报*, 29(2): 637-643) [DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2008.02.046]
- Chen Z C, Zhang B, Zhang H and Zhang W J. 2014. Vicarious calibration of Beijing-1 multispectral imagers. *Remote Sensing*, 6(2): 1432-1450 [DOI: 10.3390/rs6021432]
- Gao H L, Gu X F, Yu T, Li X Y, Gong H and Li J G. 2010. The research overview on visible and near-infrared channels radiometric calibration of space-borne optical remote sensors. *Remote Sensing Information*, (4): 117-128 (高海亮, 顾行发, 余涛, 李小英, 巩慧, 李家国. 2010. 星载光学遥感器可见近红外通道辐射定标研究进展. *遥感信息*, (4): 117-128) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2010.04.022]
- Gong H, Tian G L, Yu T, Zhang Y X, Gu X F and Gao H L. 2010. Irradiance-based calibration and validation of MODIS visible and near-infrared channels. *Journal of Remote Sensing*, 14(2): 207-218 (巩慧, 田国良, 余涛, 张玉香, 顾行发, 高海亮. 2010. MODIS 辐照度法定标试验研究. *遥感学报*, 14(2): 207-218) [DOI: 10.11834/jrs.20100201]
- Hu C M, Muller-Karger F E, Andrefouet S and Carder K L. 2001. Atmospheric correction and cross-calibration of LANDSAT-7/ETM+ imagery over aquatic environments: a multiplatform approach using SeaWiFS/MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 78(1/2): 99-107 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00252-8]
- Lacherade S, Fournie B, Henry P and Gamet P. 2013. Cross calibration over desert sites: description, methodology, and operational implementation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1098-1113 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2227061]
- Li X and Strahler A H. 1992. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2): 276-292 [DOI: 10.1109/36.134078]
- Li X Y, Gu X F, Min X J, Yu T, Fu Q Y, Zhang Y and Li X W. 2005. Radiometric cross-calibration of the CBERS-02 CCD camera with the TERRA MODIS. *Science in China Series E Engineering & Materials Science*, 48(S2): 44-60 (李小英, 顾行发, 闵祥军, 余涛, 傅俏燕, 张勇, 李小文. 2005. 利用MODIS对CBERS-02卫星CCD相机进行辐射交叉定标. *中国科学E辑: 信息科学*, 35(S1): 41-58) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-7259.2005.z1.004]
- Lv W B. 2014. Research on the Method and System of Cross-Calibration for Domestic Moderate and High-Resolution Remote Sensing Data in Reflection Bands. Chengdu: Southwest Jiaotong University (吕文博. 2014. 国产中—高分辨率遥感数据反射波段交叉辐射定标方法与体系研究. 成都: 西南交通大学)
- Lyapustin A, Wang Y, Go S, Choi M, Korkin S, Huang D, Knyazikhin Y, Blank K and Marshak A. 2021. Atmospheric correction of DSCOVR EPIC: version 2 MAIAC algorithm. *Frontiers in Remote Sensing*, 2: 748362 [DOI: 10.3389/frsen.2021.748362]
- Ma X H. 2011. Study on the Cross Calibration and Validation of CCD Cameras on HJ-1 Satellites. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2011 (马晓红. 2011. HJ-1星CCD相机交叉定标与真实性检验研究. 焦作: 河南理工大学)
- Nie J, Deng L, Hao X L, Liu M and He Y. 2018. Application of GF-4 satellite in drought remote sensing monitoring: a case study of Southeastern Inner Mongolia. *Journal of Remote Sensing*, 22(3): 400-407 (聂娟, 邓磊, 郝向磊, 刘明, 贺英. 2018. 高分四号卫星在干旱遥感监测中的应用. *遥感学报*, 22(3): 400-407) [DOI: 10.11834/jrs.20187067]
- Rao C R N, Zhang N and Sullivan J T. 2001. Inter-calibration of meteorological satellite sensors in the visible and near-infrared. *Advances in Space Research*, 28(1): 3-10 [DOI: 10.1016/S0273-1177(01)00262-9]
- Schaaf C L B, Liu J, Gao F and Strahler A H. 2011. MODIS Albedo and Reflectance Anisotropy Products from Aqua and Terra. In *Land Remote Sensing and Global Environmental Change: NASA's Earth Observing System and the Science of ASTER and MODIS, Remote Sensing and Digital Image Processing Series*, Vol. 11, B. Ramachandran, C. Justice, M. Abrams, Eds, Springer-Cerlag, 873 pp.
- Scott K P, Thome K J and Brownlee M R. 1996. Evaluation of Railroad Valley playa for use in vicarious calibration//Proceedings of SPIE 2818, *Multispectral Imaging for Terrestrial Applications*. Denver: SPIE [DOI: 10.1117/12.256090]
- Teillet P M, Fedosejevs G, Thome K J and Barker J L. 2007. Impacts of spectral band difference effects on radiometric cross-calibration between satellite sensors in the solar-reflective spectral domain. *Remote Sensing of Environment*, 110(3): 393-409 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.03.003]
- Teillet P M, Slater P N, Ding Y, Santer R P, Jackson R D and Moran M S. 1990. Three methods for the absolute calibration of the NOAA AVHRR sensors in-flight. *Remote Sensing of Environment*, 31(2): 105-120 [DOI: 10.1016/0034-4257(90)90060-Y]
- Vermote E F and Saleous N Z. 2006. Calibration of NOAA16 AVHRR over a desert site using MODIS data. *Remote Sensing of Environ-*

- ment, 105(3): 214-220 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.06.015]
- Wu W. 2019. Application of GF-4 satellite in outburst flood disaster monitoring and assessment. *Spacecraft Engineering*, 28(2): 134-140 (吴玮. 2019. 高分四号卫星在溃决型洪水灾害监测评估中的应用. *航天器工程*, 28(2): 134-140) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2019.02.020]
- Yang A X, Zhong B, Lv W B, Wu S L and Liu Q H. 2015. Cross-calibration of GF-1/WFV over a desert site using Landsat-8/OLI imagery and ZY-3/TLC data. *Remote Sensing*, 7(8): 10763-10787 [DOI: 10.3390/rs70810763]
- Yang A X, Zhong B, Wu S L and Liu Q H. 2017. Radiometric cross-calibration of GF-4 in multispectral bands. *Remote Sensing*, 9(3): 232 [DOI: 10.3390/rs9030232]
- Yang Z D, Gu S Y, Qiu H, Huang Q and Fan T X. 2004. CBERS-1's CCD image quality evaluating and cross calibrating study. *Journal of Remote Sensing*, 8(2): 113-120 (杨忠东, 谷松岩, 邱红, 黄笠, 范天锡. 2004. 中巴地球资源一号卫星 CCD 图像质量评价和交叉定标研究. *遥感学报*, 8(2): 113-120) [DOI: 10.11834/jrs.20040204]
- Zhang H, Zhang B, Chen Z C, Huang Z H. 2018. Vicarious radiometric calibration of the hyperspectral imaging microsattellites SPARK-01 and -02 over Dunhuang, China. *Remote Sensing*, 10(1): 120 [DOI: 10.3390/rs10010120]
- Zhang L. 2018. Application of GF-4 satellite in changes monitoring for water body extent of Hongze Lake in flood season. *Spacecraft Engineering*, 27(2): 129-134 (张磊. 2018. 高分四号卫星在洪泽湖汛期水体范围变化监测中的应用. *航天器工程*, 27(2): 129-134) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2018.02.020]
- Zhang Y H, Mao H Q, Wang Z T, Guo W, Li Q, Li Z Q, Chen X F and Chen H. 2016. Cross calibration between GOCI and MODIS based on spectrum and geometry matching. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 11(6): 412-422 (张玉环, 毛慧琴, 王中挺, 郭伟, 厉青, 李正强, 陈兴峰, 陈辉. 2016. 基于光谱与几何匹配的GOCI与MODIS交叉辐射定标. *大气与环境光学学报*, 11(6): 412-422) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2016.06.002]
- Zhao W N, Hu X Q, Fang W, Wang Y P and Xu N. 2015. Development and applications of intercalibration for satellite optical instruments. *Optics and Precision Engineering*, 23(7): 1921-1931 (赵维宁, 胡秀清, 方伟, 王玉鹏, 徐娜. 2015. 卫星光学仪器辐射交互定标方法的应用和发展. *光学精密工程*, 23(7): 1921-1931) [DOI: 10.3788/OPE.20152307.1921]
- Zhong B, Zhang Y H, Du T T, Yang A X, Lv W B and Liu Q H. 2014. Cross-calibration of HJ-1/CCD over a desert site using Landsat ETM + imagery and ASTER GDEM product. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(11): 7247-7263 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2310233]

Cross calibration of GF-4/PMS based on MODIS over Badain Jaran Desert

ZHANG Hao¹, LIU Tao^{1,2}, YAN Dongchuan³, YAN Yueguan⁴, CUI Zhenzhen^{1,5}

1. *Aerospace Information Research Institute(AIR) Chinese Academy of Sciences(CAS), Beijing 100094, China;*

2. *Zhongke Xingtu Space Technology Co., Ltd, Xi'an 710100, China;*

3. *Institute of Mineral Resources Research, China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 101300, China;*

4. *China University of mining and technology(Beijing), Beijing 100083, China;*

5. *School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China*

Abstract: GF-4 is the first high-resolution geostationary orbit optical remote sensing satellite in China, and it is equipped with a staring camera that covers the visible-to-mid-infrared spectrum. Providing in-orbit radiometric calibration coefficients frequently is difficult due to the lack of on-board calibration devices. To effectively monitor the radiometric performance of GF-4/PMS and provide a solid basis for quantitative applications, the cross-calibration method was used in this study to derive the calibration coefficients over a selected calibration site located in the north of Badan Jaran Desert. The cross-calibration site was identified by searching the uniform area in a high-resolution image (i.e., Landsat 8/OLI) to minimize the uniform impact on the cross-calibration results. To reduce the effects of the imaging angles of the sensor and atmospheric changes, the restraint was set to the imaging angle difference between MODIS and GF-4 (less than 20°), the imaging time difference (less than 2 h), the cloud, and image quality. In total, 13 image pairs were available from 2016 to 2018 and were used to calculate the cross-calibration coefficients after compensating for the spectral matching factors, which were simulated by MODTRAN. Results showed that (1) the cross-calibration coefficients calculated under the Lambertian assumption were highly consistent with those calculated under the Ross-Li BRDF assumption. The uncertainty was less than 7.4%, and the relative difference ranged between 0.8% and 4% when BRDF was neglected. (2) The radiometric performance of GF-4/PMS decreased slowly from 2016 to 2018, with 1% decrement per year. Thus, the proposed method can effectively improve the radiometric calibration frequency of GF-4/PMS with an acceptable accuracy and can be used for radiometric performance monitoring over the whole life cycle of the sensor.

Key words: remote sensing, cross calibration, GF-4/PMS, MODIS, uncertainty analysis

Supported by Hainan Provincial Department of Science and Technology (No. ZDKJ2019006); National Natural Science Foundation of China (No. 41771397)