

doi:10.3788/gzxb20184702.0228001

# 高分一号宽视场成像仪多场地高频次辐射定标

韦玮<sup>1,2</sup>, 张艳娜<sup>1</sup>, 张孟<sup>1,2</sup>, 赵春艳<sup>1,2</sup>, 李新<sup>1</sup>, 郑小兵<sup>1</sup>

(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, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学, 合肥 230026)

**摘要:**为了提升国产光学遥感卫星载荷的定标频次,提出了一种基于国内多场地的高频次定标方法,实现了高分一号(GF-1)宽视场成像仪(WFV)的高频次绝对辐射定标.介绍了基于多场地的高频次定标原理,针对 GF-1 WFV 的工作参数和工作特点,提出了国内定标场的优选原则,并分析了定标场地表特性的时间稳定性.利用中分辨率成像光谱仪(MODIS)的地表和大气产品替代场地定标的现场观测数据,增加了定标可用的数据量,同时用实测数据对 MODIS 地表产品进行真实性检验,实现了 GF-1 WFV 的多场地高频次定标,并将定标系数结果与官方定标结果进行比对验证.结果表明:基于国内多场地的高频次定标方法可以获得 GF-1 WFV 的时间序列定标系数,GF-1 WFV 相机 4 的定标结果与官方定标结果具有较好的一致性,各波段与官方定标结果的相对偏差分别为  $-0.49\%$ 、 $1.33\%$ 、 $-1.01\%$  和  $3.86\%$ .基于多场地的高频次定标方法可有效地提高国产卫星载荷的定标频次,及时跟踪载荷的辐射特性变化.

**关键词:**高分一号;宽视场成像仪;辐射定标;多场地;高频次

中图分类号:TP722.4; TP721.1 文献标识码:A 文章编号:1004-4213(2018)02-0228001-8

## Multisite High-frequency Radiometric Calibration of GF-1 Wide Field of View

WEI Wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Yan-na<sup>1</sup>, ZHANG Meng<sup>1,2</sup>, ZHAO Chun-yan<sup>1,2</sup>, LI Xin<sup>1</sup>, ZHENG Xiao-bing<sup>1</sup>

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

(2 University of Sciences and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** To increase the calibration frequency of Chinese optical remote sensing satellite sensor, a high-frequency calibration method based on domestic multisite was presented. And the in-flight high-frequency absolute radiometric calibration of GF-1 Wide Field of View (WFV) was conducted using this method. The theory of high-frequency calibration based on multisite was introduced. The optimized selection principle of domestic calibration site was presented according to the parameters and characteristics of GF-1 WFV. And the temporal stability of site surface was analyzed. MODIS land and atmosphere products were used to instead of *in-situ* measurements to increase the amount of available calibration data. The validation of MODIS land product was conducted using *in-site* measurements. The high-frequency calibration of GF-1 WFV4 based on Chinese multisite was carried out, and the calibration coefficients were compared with the official calibration coefficients. The result shows that time series calibration coefficients of GF-1 WFV can be obtained using the multisite high-frequency calibration method. The calibration results of GF-1 WFV4 are in good agreement with the results of the official calibration. The relative differences of GF-1 WFV4 all bands calibration coefficients of the two methods are  $-0.49\%$ ,

**基金项目:**国家自然科学基金青年科学基金(No.61505222),民用航天技术预研项目(No.D040401),中国科学院联合基金(No.6141A01011602)和中国科学院创新基金项目(No.CXJJ-15S103)资助

**第一作者:**韦玮(1989-),男,博士研究生,主要研究方向为卫星传感器在轨辐射定标.Email: wei214@mail.ustc.edu.cn

**导师(通讯作者):**郑小兵(1969-),男,研究员,博士,主要研究方向为光学辐射精确测量、卫星传感器的辐射定标技术、光学遥感技术等.

Email: xbzheng@aiofm.ac.cn

**收稿日期:**2017-07-25; **录用日期:**2017-10-20

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

1.33%, -1.01% and 3.86% respectively, which illustrates the availability of this method. The method can be used to improve the calibration frequency of Chinese remote sensing sensor, and timely track the changes of sensor.

**Key words:** GF-1; WFV; Radiometric calibration; Multisite; High-frequency

**OCIS Codes:** 280.4788; 010.0280; 120.0280; 120.5630

## 0 引言

光学遥感卫星载荷在轨运行期间受太空环境等因素的影响,其辐射特性不可避免地会出现持续性衰变<sup>[1]</sup>,在应用过程中需要对载荷的辐射特性进行及时的校正,主要校正方式包括在轨星上定标和替代定标.对于时间分辨率和定量化精度较高的应用,低频次的定标难以提供及时的载荷辐射特性校正,地物的辐射特性变化可能淹没在载荷的性能衰减中,无法准确地识别.提高在轨定标的频次对于准确掌握卫星载荷的实际在轨工作状态、及时采取校正措施是十分必要的.

目前,我国可见-近红外载荷的业务化定标以场地替代定标为主,定标频次基本上维持在一年一次的水平.场地替代定标需要在卫星过顶时刻前后通过人工准同步测量获取定标场地的地表和大气特性等参数.这种定标方式需耗费大量的人力、物力、财力和时间,并且受天气条件的影响,为了获得一次成功的外场试验可能需要耗费一个月以上的时间,已难以适应高精度高频次的遥感产品应用需求.高频次定标已成为必然趋势.

总体而言,提高卫星载荷替代定标频次的思路主要有两种<sup>[2]</sup>:一是建立装备定标场,布设现场自动化观测仪器,自动采集卫星过顶时刻场地的地表和大气特性参数,增加数据采集的样本数,提高在轨定标频次<sup>[3,4]</sup>.二是建立全球定标场网,通过全球多场地组网的方式,增加卫星过顶的频次,利用稳定目标跟踪或交叉定标的方法实现卫星载荷辐射特性的在轨监测.

国内外已有多家单位或组织进行了高频次定标的探索.地球观测卫星委员会(Committee on Earth Observation Satellites, CEOS)在全球选择了8个陆地装备场和6个伪不变场作为辐射定标场,分别用于光学卫星载荷的场地定标和长期稳定性评估.美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)通过收集全球已使用过的定标场地消息,组建全球定标场网络,期望通过各场地间数据资源的共享提高卫星载荷的有效定标次数,并希望通过发展新的定标方法提高卫星载荷的定标频次<sup>[5]</sup>.Heidinger 以利比亚沙漠、撒哈拉沙漠和阿拉伯沙漠三个定标场作为伪不变场对 NOAA-12 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)进行辐射特性的在轨监测.经过严格的条件筛选,每个场地每年有4~5次的定标机会,实现了对 NOAA-12 AVHRR 的长时间高频次衰减跟踪,得到了1992~1996年间 AVHRR 两个通道的年平均衰减率分别为3.14%和3.19%.然后用已定标的 NOAA-9 AVHRR 对 NOAA-12 AVHRR 在利比亚沙漠进行交叉定标,得到 NOAA-12 AVHRR 的时间序列绝对辐射定标系数<sup>[6]</sup>.国家卫星气象中心的孙凌使用敦煌、利比亚1、利比亚4、阿拉伯2和拉奈共5个稳定场对风云三号A星(FY-3A)中分辨率光谱成像仪(Medium Resolution Spectral Imager, MERSI)进行长时间辐射定标跟踪.采用中分辨率成像光谱仪(MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)的双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)产品、大气产品和其他业务化产品对 FY-3A MERSI 进行了高频次定标,得到了2008年~2011年期间定标系数的日更新模型.并分析了 FY-3A MERSI 的衰减趋势,其中短波波段衰减显著,412nm 波段年衰减率达到了9.7%<sup>[7]</sup>.中国资源卫星应用中心的韩启金通过夜间海洋场景数据获得高分一号(GF-1)宽视场成像仪(Wide Field of View, WFV)的偏移量信息,再以敦煌辐射校正场作为试验区,利用敦煌场的历史光谱反射率数据和实时气象数据,在2013年6月22日、23日和26日分别对 GF-1 WFV 的相机2、相机4和相机3各进行了一次在轨定标,其中 WFV2 的定标结果与官方定标结果的总体相对偏差小于5.6%<sup>[8]</sup>.

针对 GF-1 WFV 的工作模式和技术特点,本文提出了一种基于国内多个定标场的高频次定标方法,实现了对 GF-1 WFV 的长时间高频次定标.文中对基于多场地的高频次定标方法进行了描述,提出了国内定标场地优选原则,对场地的地表反射特性进行了时间稳定性分析,同时还对定标所用的地表反射率数据进行了真实性检验.利用2013年~2016年间的86幅卫星影像,采用基于多场地的高频次定标方法对 GF-1 WFV 进行了时间序列在轨绝对辐射定标,得到时间序列绝对辐射定标系数,并将定标结果与官方定标系数以及场

地定标的结果进行对比分析。

## 1 载荷介绍

高分一号卫星是我国高分辨率对地观测系统的首发卫星,于2013年4月26日发射升空。星上搭载了4台幅宽大于200公里、星下点分辨率为16米的宽视场成像仪,可获取视场拼接幅宽超过800公里的对地观测影像,重访周期可以达到4天,具有很高的时间分辨率,可为各种量化应用提供高时效的数据源。自发射以来,高分一号卫星已在国土资源、大气环境、环境保护和农业等领域发挥了重要作用。GF-1 WFV共四个波段,其中GF-1 WFV4的相对光谱响应函数如图1。

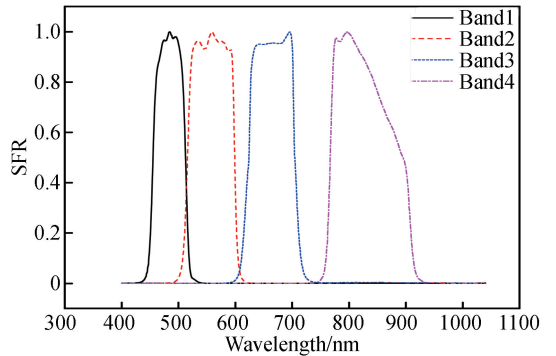


图1 GF-1 WFV4 相对光谱响应函数  
Fig.1 Spectral response functions of GF-1 WFV4

## 2 方法

### 2.1 定标原理

基于多场地的高频次定标方法主要是采用反射率基法定标方法,选用大面积均匀场,使用MODIS BRDF模型计算得定标场地表方向反射率,采用MODIS大气产品替代场地的现场实测大气数据,根据反射率基法的基本理论,使用辐射传输模型(6S)计算大气层顶表观辐亮度与卫星载荷观测计数值比较,进而获得载荷在轨绝对辐射定标系数<sup>[9-10]</sup>。通过多场地高频次定标,获取载荷的时间序列定标系数。由于GF-1 WFV的背景噪声偏移量很小,可以忽略不计,本文使用的GF-1 WFV4辐亮度定标系数的计算公式如式(1)。

$$A_i = L_i / DN_i \quad (1)$$

式中, $A_i$ 为GF-1 WFV4通道*i*的辐亮度定标系数, $L_i$ 通道*i*的表观辐亮度, $DN_i$ 通道*i*的卫星载荷输出计算值。

该方法的优势在于:通过多场地的方法增加了卫星过顶频次;采用业务化产品数据替代场地实测数据,增加定标可用数据量,降低定标成本;长时间序列的定标可以获得GF-1 WFV时间序列绝对辐射定标系数,实现对卫星载荷在轨辐射性能的实时监测和校正;短期内高频次定标可用消除单次定标的偶然性,提高定标结果的可靠性和稳定性。

### 2.2 定标场地选择与特性分析

由于GF-1 WFV在轨工作模式和特点,主要是针对我国境内区域进行成像观测,国外区域少有对地观测数据,无法利用国外定标场卫星影像数据对GF-1 WFV进行在轨定标和长期性能监测。为此本文使用国内多个定标场对GF-1 WFV进行高频次绝对辐射定标。定标场的选择原则主要是:空间均匀性高、大面积且平坦;地表特性比较稳定;大气干洁稳定、气溶胶含量低;干旱地区、降雨少。所选择的国内定标场主要分布在我国的西北部,全部为沙漠或戈壁类型场地。本次对GF-1 WFV4进行在轨定标使用的辐射定标场包括甘肃敦煌、塔克拉玛干1、塔克拉玛干2、塔克拉玛干3、青海格尔木、新疆若羌、新疆轮台和甘肃景泰(塔克拉玛干沙漠1、2、3分别为沙漠中的不同区域)。使用资源一号卫星04星(CBERS-04)10米空间分辨率的多光谱相机影像对各定标场的空间非均匀性进行评价,各场地中心区域空间非均匀性均小于3%,计算公式如式(2)。

$$U = \frac{\sigma}{\text{Mean}} \quad (2)$$

式中, $U$ 为空间非均匀性, $\sigma$ 为评价区域DN值标准偏差,Mean为评价区域DN值均值。各定标场地理位置信息如表1。GF-1 WFV4采集到的敦煌和塔克拉玛干1的L1级彩色合成图如图2,图中方框为定标场区。

表 1 国内辐射定标场位置  
Table 1 Positions of multisite in China

Site name	Longitude/(°)	Latitude/(°)	Altitude/m	Site size/(km×km)
Dunhuang	94.32	40.14	1 220	10×10
Taklimakan1	79.85	39.48	1 118	15×15
Taklimakan2	80.35	39.93	1 075	10×10
Taklimakan3	81.6	39.65	1 070	15×15
Golmud	94.69	36.35	2 910	5×5
Ruoqiang	87.73	38.73	1 042	8×8
Luntai	85.08	41.65	904	7×7
Jingtai	103.63	38.08	1 511	10×10

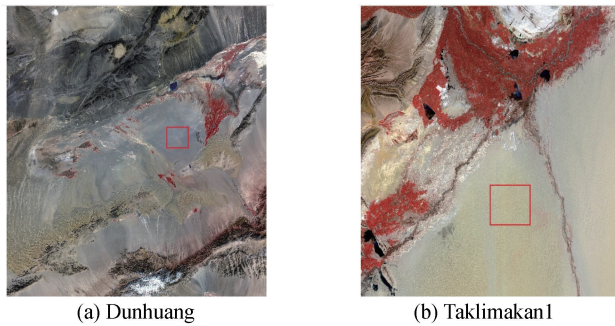


图 2 GF-1 WFV4 的敦煌和塔克拉玛干 1 影像  
Fig.2 GF-1 WFV4 images of Dunhuang and Taklimakan1

使用 MODIS 的 BRDF 模型计算得到敦煌和塔克拉玛干 1 的地表垂直反射率,2016 年全年的反射率随时间变化如图 3.两个地区的反射率总体稳定,但在一年中还是有一定变化的,将这些定标场作为反射率固定不变的稳定地物进行定标跟踪会引入较大的误差.由 MODIS BRDF 模型计算得到的各定标场 2016 年 8 月 28 日的地表反射率如图 4.由于场地都是沙漠或戈壁类型,其光谱反射率趋势都比较相近.而敦煌场由于地表是由砾石、砂和黏土组成,其反射率在幅值上较其他沙漠场偏低.

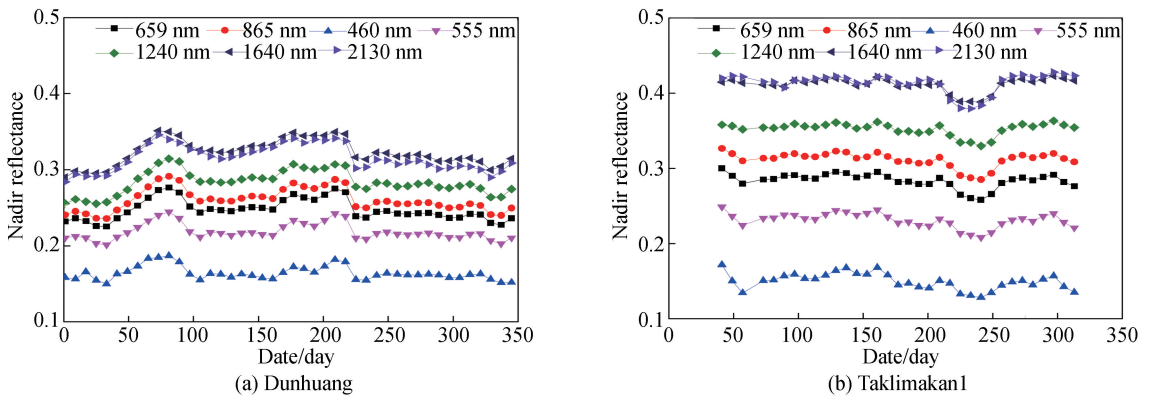


图 3 2016 年敦煌和塔克拉玛干 1 的地表反射率  
Fig.3 Reflectance of Dunhuang and Taklimakan1 of 2016

### 2.3 定标基础数据使用

作为高频次定标应用,对地表反射率数据的时间分辨率有较高的要求,同时考虑场地 BRDF 特性的影响,本文选择 MODIS 的 MCD43 系列产品为高频次定标提供反射率数据<sup>[11]</sup>.由于最新的 C6 版本的 MCD43 产品数据在敦煌场和若羌场的 BRDF 数据全为无效的填充值,而 C5 版本的分辨率相对较高的 MCD43A1 数据目前无法下载全部的数据,本文最终选择 C5 版本的 MCD43C1 为高频次定标提供反射率数据. MCD43C1 产品是由 Terra 和 Aqua MODIS 两颗载荷在 16 天内的多角度地表反射率反演得到的 BRDF 模型参数.该产品使用的 BRDF 模型为基于 Ross-Li 核的半经验模型,产品中的参数为 MODIS 相应波段的 3 个核函数: $f_{iso}$ 、 $f_{vol}$ 、 $f_{geo}$ ,分别表示各向同性散射系数、体散射系数和几何光学散射系数.场地的地表方

向反射率可以通过式(3)计算得到<sup>[12-13]</sup>.

$$R(\lambda, \theta_S, \theta_V, \Delta\varphi) = f_{iso}(\lambda) + f_{vol}(\lambda)K_{vol}(\theta_S, \theta_V, \Delta\varphi) + f_{geo}(\lambda)K_{geo}(\theta_S, \theta_V, \Delta\varphi) \quad (3)$$

式中,  $\lambda$  为波长,  $\theta_S$  是太阳天顶角,  $\theta_V$  是观测天顶角,  $\Delta\varphi$  为相对方位角,  $R(\lambda, \theta_S, \theta_V, \Delta\varphi)$  是地表方向反射率,  $K_{vol}(\theta_S, \theta_V, \Delta\varphi)$  是体散射核,  $K_{geo}(\theta_S, \theta_V, \Delta\varphi)$  是几何光学散射核. 两个核参数均只与观测几何条件相关. 用该 BRDF 模型数据, 可以直接计算得到卫星观测方向反射率, 减少了场地非朗伯特特性的影响, 可应用于 GF-1 WFV 等大角度观测载荷的在轨绝对辐射定标.

由于 MODIS BRDF 产品只能获取 MODIS 前 7 个波段的地表方向反射率, 而 GF-1 WFV 和 MODIS 的通道并不完全对应, 因此需要对两个载荷进行通道光谱匹配. 沙漠、戈壁定标场的地表反射率在非强吸收光谱区间具有相对平滑的光谱曲线, 可以通过对 MODIS 的前 7 个波段方向反射率进行三次样条插值, 获得光谱分辨率为 1nm 的平滑的场地高光谱反射率, 再用 GF-1 WFV4 的通道光谱响应函数对高光谱反射率进行通道积分, 进而得到 GF-1 WFV4 的等效通道反射率<sup>[14]</sup>, 计算公式如式(4).

$$\rho_i = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_i(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

式中  $\rho_i$  为 GF-1 WFV4 通道  $i$  的等效通道反射率,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为通道  $i$  的起始和截止波长,  $\rho(\lambda)$  为三次样条插值得到的高光谱反射率,  $R_i(\lambda)$  为通道  $i$  的相对光谱响应函数.

气溶胶光学厚度采用 MODIS 的大气产品 MYD04, 使用陆地深蓝算法的结果, 水汽含量和臭氧含量均采用 MODIS 的大气产品 MYD07. 辐射传输模型选用 6S, 大气模型选择 1962 美国标准大气, 并使用水汽含量和臭氧含量进行描述. 考虑到所选定标场均为沙漠或戈壁定标场, 场地的气溶胶模式均选择沙漠型.

为了保证单次定标结果的准确性和可靠性, 需要对用于定标的基础数据进行数据质量控制. 主要包括以下两点: 一是对 MODIS BRDF 产品的数据反演质量进行判断, 当 BRDF Quality 等于 0 或 1 时, 认为是 BRDF 的数据反演质量是可靠的, 可用于计算地表反射率; 二是对气溶胶光学厚度进行判断, 对于气溶胶光学厚度大于 0.3 的情况, 认为气溶胶含量过高, 不适合定标予以剔除.

### 2.4 反射率数据验证

精确的地表反射率数据是保障绝对辐射定标精度的关键因素, 为了确保反射率产品的准确性, 使用敦煌场的 ASD 实测地表反射率与 MODIS BRDF 产品计算得到的通道反射率进行比对验证. 2015 年 8 月 16 日和 2015 年 8 月 20 日两天的反射率比对结果如图 5 所示. 经对比发现, 在 MODIS 的前 5 个波段, MODIS 得

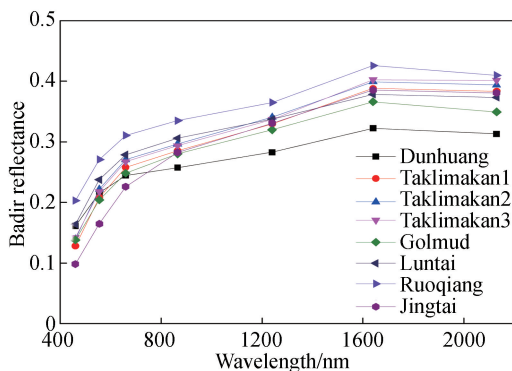
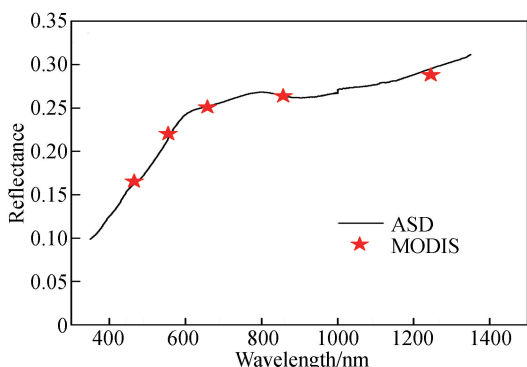
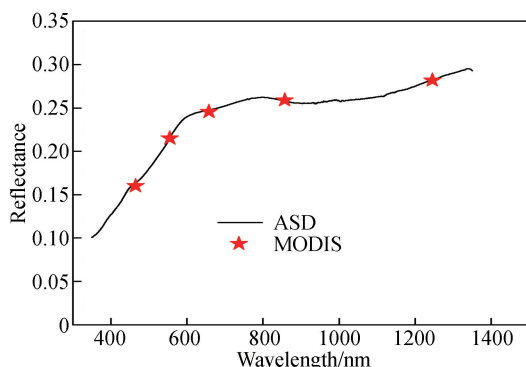


图 4 2016 年 8 月 28 日各场地反射率  
Fig.4 Reflectance of the selected sites on August 28, 2016



(a) 2015-08-20 12:54



(b) 2015-08-16 12:15

图 5 MODIS 的地表反射率与 ASD 实测地表反射率比较

Fig.5 Comparison of reflectance derived from MODIS product and ASD

到的地表反射率和敦煌实测反射率的相对偏差在 $\pm 2.7\%$ 以内,表明 MODIS 的 BRDF 产品具有较高的精度,可用于绝对辐射定标.

### 3 定标应用及结果

利用国内 8 个定标场对 GF-1 WFV4 从 2013 年~2016 年进行了时间序列定标.通过筛选,总共进行了 86 个频次的有效定标,得到了时间序列定标系数,并与官方公布的定标系数进行对比.结果如图 6 所示,基于国内多定标场的时间序列定标得到的定标系数与官方发布的定标系数在整体趋势有很好的 consistency,可以很好的描述卫星载荷在轨期间的辐射特性变化趋势.

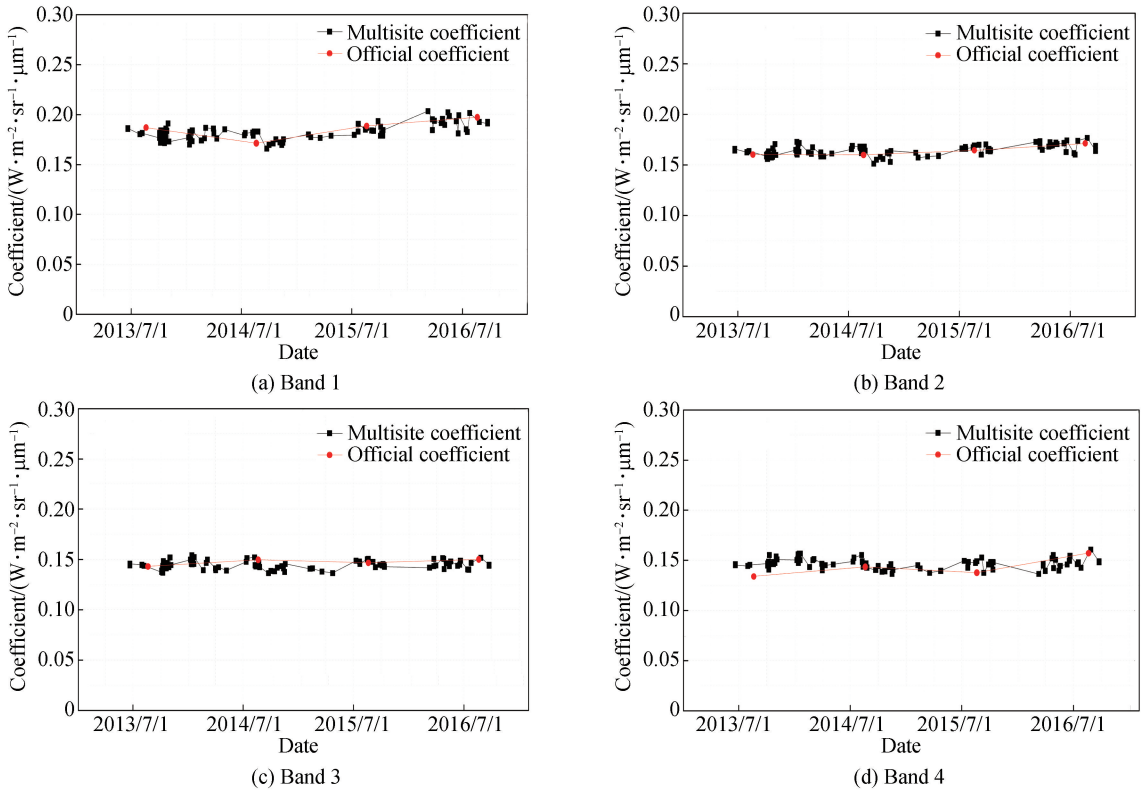


图 6 多场地时间序列定标结果

Fig.6 Time series calibration coefficients of multisite

由图 6 可知,基于多场地的时间序列定标结果有很好的时间连续性,可以持续跟踪卫星载荷的在轨辐射特性变化.但是也可以看到,在每年的 1 月 1 日前后都会有定标系数的空档期,主要是由于我们所选的国内定标场主要集中在我国的西北,在冬季由于降雪或其他恶劣天气的影响,明显降低了该时间段内的可用定标次数.

为了定量的比较多场地时间序列定标结果,将 8 月和 9 月间多次定标系数进行平均,并与官方的定标系数进行比较,得到两个结果的相对偏差,如表 2.对于波段 4,多场地定标结果与官方结果偏差较大.除 2013 年波段 4、2014 年波段 1/3/4 和 2015 年波段 4 外,其他的相对偏差均小于 3%.四年间各波段的平均相对偏差分别 $-0.49\%$ 、 $1.33\%$ 、 $-1.01\%$ 和  $3.86\%$ .由此可知,基于多场地的高频次定标方法是可行的.

表 2 多场地定标系数与官方定标系数相对偏差

Table 2 Relative differences between multisite coefficients and official coefficients

Band	Relative difference/%				
	2013	2014	2015	2016	Mean
1	-2.95	4.68	-1.07	-2.64	0.49
2	2.07	2.43	1.72	-0.92	1.33
3	0.55	-3.70	0.25	-1.13	-1.01
4	8.50	3.44	6.37	-2.86	3.86

同时还利用 2015 年 8 月 16 日和 20 日两天的现场实测数据,采用反射率基法对 GF-1 WFV4 进行了场地定标<sup>[15]</sup>.将两天敦煌场地定标的结果进行平均,与多场地定标结果和官方定标结果进行了对比,结果如图 7.敦煌场定标结果与多场地定标结果很非常一致,相对偏差不大于 2%.前 3 个波段,三种方法的比较一致,在波段 4,多场地定标系数和敦煌场地定标系数相近,但比官方定标系数高出了 6.37%.

针对波段 4,多场地定标结果与官方定标结果相差较大,通过分析有可能由以下几方面的原因造成的<sup>[16-17]</sup>:1) WFV 的波段 4 带宽较宽,光谱范围为 0.77~0.89  $\mu\text{m}$ ,而在 0.81~0.84  $\mu\text{m}$  则是较强的水汽吸收峰,会对辐射传输计算产生较大的影响,MODIS 水汽含量产品作为卫星反演产品,在精度上稍有欠缺,会对辐射定标的精度产生一定的影响;2) MODIS BRDF 模型计算的地表反射率会带来一定的误差;3) 地表反射率的插值计算,虽然由 MODIS 模型计算的地表通道反射率有较高的精度,但是三次样条插值仍然无法做到与真实地表光谱曲线的完全吻合,在进行通道光谱匹配时会带来一定的误差.

#### 4 结论

为改善目前国产卫星载荷定标现状,提高定标频次,适应新时期的遥感应需求,本文提出了一种基于多场地的高频次在轨定标方法,采用 MODIS 业务化产品替代场地实测数据,对卫星进行在轨绝对辐射定标.通过空间维、时间维的扩展,提高了定标频次.多场地定标利用其短期内的高频次定标的优势,可用消除单次定标结果的偶然性,提高定标结果的可靠性和稳定性;同时利用其长时间的定标结果可以实现卫星载荷的在轨辐射特性连续监测,及时校正卫星载荷的性能衰减.

利用 2013 年~2016 年间 GF-1 WFV4 的历史卫星影像,采用基于多场地的高频次定标方法对其进行时间序列在轨定标,得到 GF-1 WFV 的时间序列绝对辐射定标系数,并将定标结果与官方定标系数进行了定量比较.除波段 4、和 2014 年波段 1、3 外,其他的相对偏差均小于 3%.四年四个波段的平均相对偏差分别 -0.49%、1.33%、-1.01%和 3.86%.由此可见多场地高频次定标方法具有较好的可靠性和稳定性.同时用敦煌场地实测数据进行在轨定标,得到的定标系数与多场地定标结果非常一致,相对偏差不超过 2%,验证了多场地高频次定标的准确性.

在反射率数据使用方面,由于最新的 C6 版本的 MODIS BRDF 产品在部分定标场无有效数据,在本文中并没有得到使用.在后期的进一步研究中,为了提高反射率数据空间分辨率的匹配程度,可以使用 C6 版本的更高空间分辨率的 MCD43A1 产品.在定标场地的使用方面,受限于国内场地的稳定性、动态范围、地理位置以及天气情况等因素,定标频次和定标精度都受到了一定的影响.在未来,一方面可以通过定期观测撒哈拉沙漠、阿拉伯沙漠等更稳定的大面积定标场,扩大多场地的全球覆盖范围;另一方面,拓展定标场地物覆盖类型,扩大地物辐射特性的动态范围,实现更可靠、更稳定的在轨辐射定标跟踪,为国产卫星载荷的业务化定标提供方法参考.

#### 参考文献

[1] LIANG Shun-lin. Quantitative remote sensing of land surfaces[M]. FAN Jie-wen, et al Transl, Beijing: Science Press, 2009: 130-141.  
梁顺林. 定量遥感[M]. 范闻捷,等译,北京:科学出版社,2009:130-141.

[2] ZHENG Xiao-bing. Some respects for development of radiometric calibration techniques for optical remote sensing satellites[J]. *Journal of Atmospheric And Environmental Optics*, 2014, **9**(1): 2-8.  
郑小兵. 发展光学遥感卫星辐射定标技术的几点思考[J]. *大气与环境光学学报*, 2014, **9**(1): 2-8.

[3] MEYGRET A, SANTER R and BERTHELOT B. ROSAS a robotic station for atmosphere and surface characterization dedicated to on-orbit calibration[C]. SPIE, 2011, **8153**: 815311.

[4] QIU Gang-gang. Development and calibration applications of automatic observation system on satellite radiometric calibration site[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.

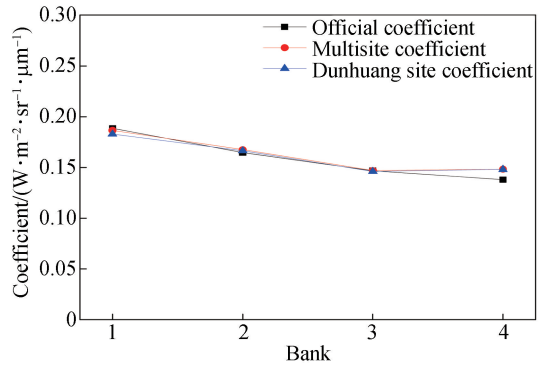


图 7 三种定标方法的结果比较  
Fig.7 Comparison of three methods

- 邱刚刚. 卫星辐射校正场自动化观测系统的研制与定标应用[D]. 合肥:中国科学技术大学,2017.
- [5] TEILLET P M, BARS J A, CHANDER G, *et al.* Prime candidate earth targets for the post-launch radiometric calibration of space-based optical imaging instruments[C]. SPIE, 2007, **6677**: 66770S.
- [6] HEIDINGER A K, SULLIVAN J T, RAO C R. Calibration of visible and near-infrared channels of the NOAA-12 AVHRR using time series of observations over deserts.[J].*International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24**(18): 3635-3649.
- [7] SUN Ling, HU Xiu-qing, GUO Mao-hua, *et al.* Multisite calibration tracking for FY-3A MERSI solar bands[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2013, **3**(4): 84-96.  
孙凌,胡秀清,郭茂华,等. 风云三号 A 星中分辨率光谱成像仪反射太阳波段的多场地定标跟踪[J]. 气象科技进展, 2013,**3**(4):84-96.
- [8] HAN Qi-jin, FU Qiao-yan, ZHANG Xue-wen, *et al.* High-frequency radiometric calibration for wide field-of-view sensor of GF-1 satellite[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(7): 1707-1714.  
韩启金,傅俏燕,张学文,等. 高分一号卫星宽视场成像仪的高频次辐射定标[J]. 光学精密工程,2014,**22**(7):1707-1714.
- [9] BIGGAR S F, In-flight methods for satellite sensor absolute radiometric calibration[D]. Tucson: The University of Arizona, 1990.
- [10] HAN Qi-jin, ZHANG Xue-wen, QIAO Zhi-yuan, *et al.* Wide dynamic radiometric calibration of GF-1 PMS sensors using multi-test sites[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(1): 127-133.  
韩启金,张学文,乔志远,等. 高分一号卫星 PMS 相机多场地宽动态辐射定标[J]. 红外与激光工程,2015,**44**(1):127-133.
- [11] SUN Ling, HUXiu-qing, XU Na, *et al.* Postlaunch calibration of Feng Yun-3B MERSI reflective solar bands[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, **51**(3): 1383-1392.
- [12] STRAHLER AH , MULLER J P, MODIS Science Team Members. MODIS BRDF/albedo product: Algorithm theoretical basis document version 5.0[Z]. 1999.
- [13] WANG Ling, HU Xiu-qing, CHEN Lin. FY-3C/MERSI calibration for solar band using multi-reflectance stable targets [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(7): 1911-1920.  
王玲,胡秀清,陈林. 基于多种亮度稳定目标的 FY-3C/中分辨率光谱成像仪的反射太阳波段辐射定标[J]. 光学精密工程,2015,**23**(7):1911-1920
- [14] LIU J J, LI Z, QIAO Y L, *et al.* A new method for cross-calibration of two satellite sensors[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, **25**(23): 5267-5281.
- [15] LI Yuan, RONG Zhi-guo, ZHENG Zhao-jun, *et al.* Post launch site calibration of visible and near-infrared channels of FY-3A visible and infrared radiometers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **17**(12): 2966-2974.  
李元,戎志国,郑照军,等. FY-3A 扫描辐射计的可见近红外通道在轨场地定标[J]. 光学精密工程,2009,**17**(12):2966-2974.
- [16] HU Xiu-qing, LIU Jing-jing, QIU Kang-mu, *et al.* New method study of sites vicarious calibration for SZ-3/CMODIS [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009, **29**(5): 1153-1159.  
胡秀清,刘京晶,邱康睦,等. 神舟 3 号飞船中分辨率成像光谱仪场地替代定标新方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009,**29**(5):1153-1159.
- [17] LIU Li, GAO Hai-liang, PAN Zhi-qiang. On-orbit radiometric calibration method research based on deep learning theory[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2017, **38**(2): 64-71.  
刘李,高海亮,潘志强,等. 基于深度学习的在轨辐射定标方法研究[J]. 航天返回与遥感,2017,**38**(2):64-71.