

基于自动辐射定标场的高分六号宽幅载荷时序绝对辐射定标及趋势分析

Time-series absolute radiometric calibration and trend analysis of the wide swath sensor onboard GF-6 satellite with automatic radiometric calibration site

刘耀开; 马灵玲; 王任飞; 郑青川; 宋培兰; 李婉; 赵永光; 王宁; 高彩霞; 侯晓鑫; 金金

引用本文:

刘耀开, 马灵玲, 王任飞, 郑青川, 宋培兰, 李婉, 赵永光, 王宁, 高彩霞, 侯晓鑫, 金金. 2023. 基于自动辐射定标场的高分六号宽幅载荷时序绝对辐射定标及趋势分析. 遥感学报, 27 (3): 599-609 DOI: 10.11834/jrs.20232197.

Liu Y K, Ma L L, Wang R F, Zheng Q C, Song P L, Li W, Zhao Y G, Wang N, Gao C X, Hou X X and Jin J. 2023. Time-series absolute radiometric calibration and trend analysis of the wide swath sensor onboard GF-6 satellite with automatic radiometric calibration site. National Remote Sensing Bulletin, 27 (3): 599-609 DOI: 10.11834/jrs.20232197.

在线阅读 View online: <http://www.ygxb.ac.cn/thesisDetails?columnId=35922942>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

广东省和江苏省大气甲醛时空变化对比分析

Comparative analysis of long-term (2005—2016) spatiotemporal variations in high-level tropospheric formaldehyde (HCHO) in Guangdong and Jiangsu Provinces in China

遥感学报. 2019, 23(1):137-154.

{{relationArticle2.title}}

{{relationArticle2.enTitle}}

{{relationArticle3.title}}

{{relationArticle3.enTitle}}

{{relationArticle4.title}}

{{relationArticle4.enTitle}}

{{relationArticle5.title}}

{{relationArticle5.enTitle}}

基于自动辐射定标场的高分六号宽幅载荷时序绝对辐射定标及趋势分析

刘耀开¹, 马灵玲¹, 王任飞¹, 郑青川², 宋培兰¹,
李婉¹, 赵永光¹, 王宁¹, 高彩霞¹, 侯晓鑫², 金金²

1. 中国科学院空天信息创新研究院 中国科学院定量遥感信息技术重点实验室, 北京 100094;

2. 内蒙古北方重工业集团有限公司, 包头 014033

摘要: 卫星遥感载荷在轨绝对辐射定标对保证不同来源产品的辐射一致性和提升高分共性产品反演精度至关重要。传统基于人工同步测量的场地定标方法由于受到卫星过境时刻成像条件、地表及大气测量条件等限制, 难以满足准确校正遥感载荷自身辐射性能在生命周期内变化的需求。本文针对国产高分六号宽幅载荷 (GF-6/WFV) 大角度观测的特点, 提出了利用自动辐射定标场的 GF-6/WFV 载荷在轨时序绝对辐射定标方法, 基于该方法可得到载荷可量化的时序绝对辐射定标结果及其不确定度, 并且通过显著提升在轨定标频次实现卫星载荷辐射性能的趋势变化持续跟踪。基于该方法实现了 2019 年 8 月至 2021 年 10 月期间过境自动辐射定标场 41 频次的 GF-6/WFV 自动辐射定标且定标结果的不确定度优于 5% (第 7 波段除外), 对时序定标结果进行趋势分析得到 GF-6/WFV 载荷各波段辐射定标系数年变化在 1.10%—4.59%; 此外, 以高精度在轨卫星载荷 MODIS 和 Sentinel-2/MSI 为参考的 GF-6/WFV 载荷第 1 至第 4 波段交叉验证结果的相对差异绝对平均值在 2.12%—6.09%。说明本文方法可实现 GF-6/WFV 载荷的时序在轨绝对辐射定标和全生命周期辐射性能的趋势变化监测, 有效支撑国产高分共性遥感产品生产和提升国产遥感数据量化应用水平。

关键词: 时序辐射定标, GF-6/WFV, 不确定度分析, 趋势分析, 交叉验证

中图分类号: P2

引用格式: 刘耀开, 马灵玲, 王任飞, 郑青川, 宋培兰, 李婉, 赵永光, 王宁, 高彩霞, 侯晓鑫, 金金. 2023. 基于自动辐射定标场的高分六号宽幅载荷时序绝对辐射定标及趋势分析. 遥感学报, 27(3): 599-609

Liu Y K, Ma L L, Wang R F, Zheng Q C, Song P L, Li W, Zhao Y G, Wang N, Gao C X, Hou X X and Jin J. 2023. Time-series absolute radiometric calibration and trend analysis of the wide swath sensor onboard GF-6 satellite with automatic radiometric calibration site. National Remote Sensing Bulletin, 27(3): 599-609 [DOI: 10.11834/jrs.20232197]

1 引言

高分六号卫星 (GF-6) 于 2018 年 6 月 2 日成功发射, 是国家高分辨率对地观测系统重大专项中的一颗低轨光学遥感卫星。与高分一号宽幅载荷 (GF-1/WFV) 相比, GF-6 搭载的宽幅载荷 (WFV) 新增两个可有效反映植被特有光谱特性的红边波段, 旨在为农、林、草等自然资源环境要素监测提供高精度、量化的技术支撑手段 (梁继等, 2020; 黄建文等, 2021; 李晓雅等, 2021)。高精度在轨

绝对辐射定标是 GF-6/WFV 遥感数据量化应用的前提, 对提高遥感产品生产和量化应用水平具有重要意义。国际上, 主要采用星上定标系数对诸如 MODIS、Sentinel-2/MSI、Landsat 8/OLI 等光学遥感载荷进行在轨绝对辐射定标并辅以场地定标对星上定标结果进行监测。遗憾的是高分六号卫星缺少星上定标装置而无法实现宽幅载荷的在轨实时辐射定标, 交叉定标和场地定标是目前国内大多数光学遥感载荷开展绝对辐射定标的主要技术手段。

收稿日期: 2022-04-24; 预印本: 2022-12-05

基金项目: 中科院空天院重点部署项目 (编号: E0Z206030F); 中国科学院青年创新促进会项目 (编号: 2021118)

第一作者简介: 刘耀开, 研究方向为遥感载荷定标与真实性检验、遥感建模与参数反演。E-mail: liuyk@aircas.ac.cn

通信作者简介: 马灵玲, 研究方向为遥感定标与真实性检验方法及高光谱遥感数据处理。E-mail: mall@aircas.ac.cn

传统人工场地定标方法需要花费大量人力物力进行同步测量试验,而且受到卫星过境时刻的成像条件、地表及大气测量条件等限制(高海亮等,2010;Gong等,2010),难以对卫星遥感载荷在轨辐射性能退化情况进行准确监测和校正。为了克服传统人工场地定标方法的局限性,国内外学者相继提出利用无人值守的自动观测系统代替传统人工同步测量的方式开展卫星遥感载荷在轨绝对辐射定标。比如,美国亚利桑那大学光学遥感团队在美国 Railroad Valley 的辐射定标测试场(RadCaTS)部署无人值守自动观测系统获取场地的地表反射和大气参数,并成功应用于 Landsat 7/ETM+、Landsat 8/OLI、MODIS、SNPP/VIIRS、Sentinel-2/MSI 等光学遥感载荷的在轨绝对辐射定标和验证(Czapla-Myers等,2010,2015;Barsi等,2018;Czapla-Myers和Anderson,2020)。法空局科研人员在 CE318 太阳光度计基础上研发了地表和大气特性参数一体化测量设备(ROSAS)并部署在法国 La Crau 定标场用于实时获取场地的地表和大气特性参数,并成功应用于 SPOT 多光谱载荷的在轨辐射定标(Schmechtig等,1997;Santer等,2003;Meygret等,2011)。欧空间与法空局合作在纳米比亚的 Gobabeb 定标场部署了同样的 ROSAS,基于该设备获取的场地地表和大气特性参数实现了 Sentinel-2/MSI 的在轨绝对辐射定标和验证(Marcq等,2018)。国内学者尝试基于敦煌辐射校正场部署的自动化多通道辐射计测量数据对 AQUA/MODIS、JPSS1/VIIRS、FY-3C/VIRR 等载荷进行自动化辐射定标试验,其结果与星上定标结果差异小于 5%(邱刚刚等,2016;吕佳彦等,2017;张孟等,2019;Li等,2019)。这些自动辐射定标场的共同特点是采用通道式辐射计测量的通道反射辐射亮度先计算得到场地多通道地表反射率,然后在假设场地的光谱特性形状不变的情况下,以场地的历史高光谱地表反射率为参考,将计算的场地多通道地表反射率通过平移等方式得到场地的高光谱地表反射率。由科技部资助建立的国家高分辨遥感综合定标场(简称“包头场”)通过自研的自动观测系统则采用高光谱辐射计直接测量定标场地的连续高光谱辐射亮度并计算得到定标场的高光谱地表反射率,在一定程度上降低了地表反射率自动获取的误差(Wang等,2017)。基于包头场

自动观测系统获取的数据已先后成功应用于 Landsat 8/OLI、Sentinel-2/MSI、ZY-3 等国内外光学遥感载荷的在轨绝对辐射定标和验证(Liu等,2017,2018;庞博等,2019;Li等,2021)。

为进一步提升太阳反射谱段遥感载荷的在轨辐射定标频次和精度,在国际上提供全球统一质量标准的辐射定标业务化运行服务综合能力,国际对地观测委员会(CEOS)定标与真实性检验工作组(WGCV)于2014年发起了全球自主辐射定标场网 RadCalNet (Radiometric Calibration Network) 计划。RadCalNet 首批具备自动化辐射定标能力并通过 CEOS/WGCV 严格入网认证的示范场地包括中国的包头场、美国 Railroad Valley 场、法国 La Crau 场和欧空局 Gobabeb 场(Bouvet等,2019)。RadCalNet 为用户提供 30 min 时间间隔和 10 nm 光谱间隔的大气层顶表观反射率产品,该产品目前被广泛用于 Landsat 8/OLI 和 Sentinel-2/MSI (Jing等,2019;Alhammoud等,2019;Sterckx和Wolters,2019)、KOMPSAT-3A(Kim和Lee,2020)、高分以及资源等卫星遥感载荷的定标和真实性检验(李传荣等,2021;Li等,2021;唐洪钊等,2022)。

本文针对国产 GF-6/WFV 大角度观测特点,介绍了一种考虑自动辐射定标场二向反射特性的 GF-6/WFV 高频次自动辐射定标方法,以实现 GF-6/WFV 的高频次绝对辐射定标以及载荷辐射性能趋势变化监测。

2 定标方法

2.1 自动辐射定标场地介绍

本文选用国家高分辨遥感综合定标场(简称“包头场”)作为 GF-6/WFV 载荷自动辐射定标场地。包头场位于内蒙古包头市区西北 50 km 左右,场地平均海拔约 1270 m,场地地表覆盖多样、气候干燥、四季少雨,适合开展遥感器定标和真实性检验(Li等,2021)。包头场布设的黑灰白三色灰阶固定靶标(单一靶标尺寸 48 m×48 m)可满足空间分辨率优于 10 m 的遥感载荷绝对辐射定标和评价,此外,试验场内有约 300 m×300 m 尺寸的大面积沙地自然场景可满足中高等空间分辨率优于 30 m 的遥感载荷绝对辐射定标和真实性检验。考虑到 GF-6/WFV 载荷的空间分辨率为 16 m,为满

足用于绝对辐射定标的像元个数不少于 7×7 个像元，本文主要选用包头场的沙地自然场景作为地面参考目标（图1），利用包头场常态化自动化观测设备（图1），实时获取高分卫星过境包头场的地面和大气同步数据，所有设备实现全自动化测量和数据自动传输。此外，为了提高GF-6/WFV绝对辐射定标频次，综合使用了RadCalNet提供的美国Railroad Playa场、法国La Crau场、欧空局Gobabeb场晴空条件下半小时1次、10 nm光谱分辨率的辐射定标产品。需要说明的是，由于GF-6/WFV载荷观测角度较大，而RadCalNet发布的辐射定标产品没有提供对应场地的BRDF模型。因此，在数据匹配筛选时，只选用GF-6/WFV在美国Railroad Playa、法国La Crau、欧空局Gobabeb场成像观测角度小于 10° 的数据参与绝对辐射定标。



图1 包头场沙地自然场景及部署的地表和大气特性自动观测系统(上图:沙地自然场景;下左图:地表反射光谱自动测量系统;下右图:全自动太阳光度计)

Fig. 1 Natural desert target and automatic observation system at Baotou calibration site (Top panel: natural desert target, bottom panel left: automatic observation system of surface characteristics, bottom panel right: automatic sun photometer)

2.2 GF-6/WFV 载荷影像数据获取

本研究使用GF-6/WFV载荷影像数据主要来源于中国科学院空天信息创新研究院科学数据中

心，从科学数据中心总共查询到GF-6/WFV过境包头场、RVP场、Gobabeb场、La Crau场共计123次，经质量控制筛选后有效匹配数据41次，其中，包头场26次，RVP场5次、La Crau场4次、Gobabeb场6次，如图是2021年10月17日过境包头场的GF-6/WFV真彩色合成图像（红框是沙地自然场景），提取GF-6/WFV载荷影像数据所有日期对应红框区域的DN值用于在轨绝对辐射定标系数计算。根据GF-6/WFV成像日期和时间提取载荷过境自动辐射定标场（包括包头场26次，RVP场5次、La Crau场4次、Gobabeb场6次）的观测天顶角和方位角（图3）以及气溶胶光学厚度和水汽含量（图4）。



图2 2021年10月17日过境包头场的GF-6/WFV真彩色合成图像

Fig. 2 Collected GF-6/WFV truth color image at Baotou calibration site on October 17, 2021

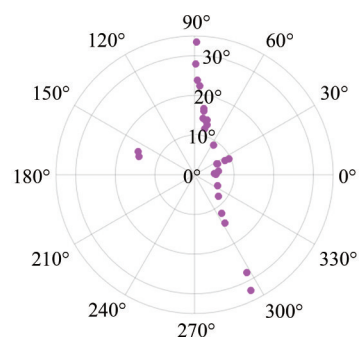


图3 GF-6过境自动辐射定标场(包头场、RVP场、La Crau场以及Gobabeb场)的WFV载荷观测天顶角和方位角

Fig. 3 The view zenith and azimuth angles of WFV sensor at time of GF-6 satellites overpassing automatic calibration sites (Baotou site, RVP site, La Crau site and Gobabeb site)

2.3 自动辐射定标数据标准化处理方法

针对自动辐射定标场地表和大气等自动测量系统获取的数据特点，构建自动化辐射定标数据标准化处理流程，对自动测量数据进行标准化处理（图5）。从图5中可以看出，数据处理主要包括原始数据获取、数据标定、数据质量控制和标

识、BOA（大气层底）标准辐射定标产品生产、TOA（大气层顶）标准辐射定标产品生产，下面对自动化辐射定标数据标准化处理的关键步骤进行详细介绍。

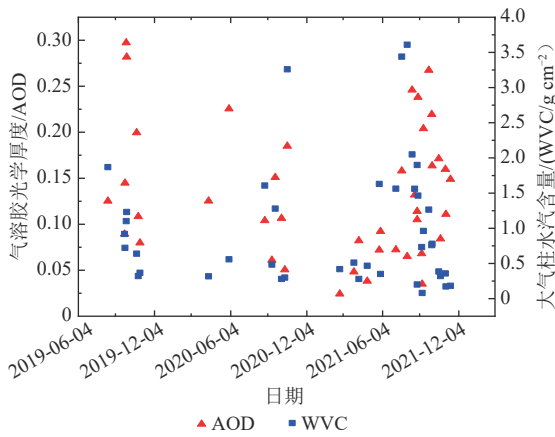


图4 GF-6过境自动辐射定标场(包头场、RVP场、La Crau场以及Gobabeb场)的气溶胶厚度和水汽含量
Fig. 4 The aerosol optical depth and water vapor content at the time of GF-6 satellite overpassing automatic calibration sites (Baotou site, RVP site, La Crau site and Gobabeb site)

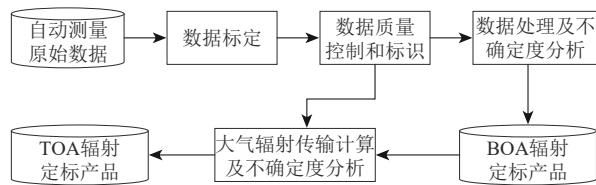


图5 自动辐射定标产品标准化处理流程
Fig. 5 Flowchart for standard processing of radiometric calibration product

2.3.1 数据质量控制控制和标识

自动辐射定标数据标准处理的关键一步是对获取数据进行质量控制和标识，因此，构建了如图6所示的标准辐射定标产品质量控制和标识方法。从图中可以看出，标准辐射定标产品质量控制和标识流程为大气异常→云覆盖→地表特性数据异常→数据缺失→其他不确定性因素，下面对不同因素的质量控制和标识方法进行介绍。

(1) 大气异常判断标准：以自动辐射定标场观测的气溶胶光学厚度数据作为判断依据，当AOT@550 nm 大于质量控制规则阈值（AOD=0.3）时，标记大气状况异常代码9995；

(2) 有云判断标准：从自动辐射定标场全天天空成像仪观测数据中提取的云覆盖参数为依据，

当检测到有云且云覆盖超过10%时，标记为云覆盖代码9996；

(3) 地表反射特性数据异常判断标准：以自动辐射定标场前五天地表反射率数据作为参考，计算当前数据与前五天数据之间的标准差，当标准差大于5%时，标记地表特性数据异常代码9997；

(4) 数据缺失判断标准：当自动辐射定标场的地表反射特性观测数据缺失，标记数据异常代码9998；

(5) 是否处理到TOA标准辐射定标产品：当BOA标准辐射定标产品不处理到TOA标准辐射定标产品时，标记代码9999。

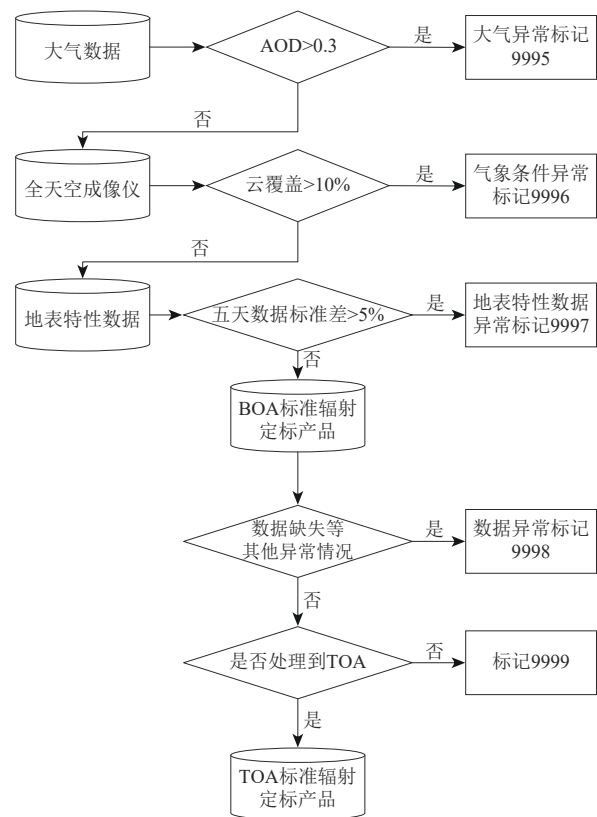


图6 标准辐射定标产品质量控制和标识方法
Fig. 6 Quality control and identification method of standard radiometric calibration products

2.3.2 BOA标准辐射定标产品计算

自动辐射定标场地面目标的地表反射率准确获取是BOA标准辐射定标产品的关键，也是确保定标结果可靠性和精度的前提。包头场地表反射光谱自动测量系统采集的是地面目标反射辐射亮度光谱，包头场地面目标的地表反射率光谱根据如下公式计算得到：

$$\rho_{\text{BOA}}(\lambda) = \frac{\pi L_{\text{ground}}(\lambda)}{E_{\text{sun}}(\lambda)\tau_{\text{dir}}(\lambda)\cos\theta + E_{\text{sky}}(\lambda)} \quad (1)$$

式中, $\rho_{\text{BOA}}(\lambda)$ 是定标场地的地表反射率; $L_{\text{ground}}(\lambda)$ 是地表反射光谱自动测量系统采集的定标场地反射辐亮度光谱, 需利用计量院实验室标定系数进行校正; $E_{\text{sun}}(\lambda)$ 是大气层外太阳辐照度, $\tau_{\text{dir}}(\lambda)$ 是太阳到地表方向的直射透过率, θ 是太阳天顶角, $E_{\text{sky}}(\lambda)$ 是天空散射辐射。其中, $\tau_{\text{dir}}(\lambda)$ 和 $E_{\text{sky}}(\lambda)$ 由定标场地观测的气溶胶光学厚度、水汽含量等大气参数驱动大气辐射传输模型 (MODTRAN-5) 模拟计算得到。对地表反射率计算过程中涉及的数据测量、辐射传输模拟计算等因素进行不确定度分析得到 BOA 标准辐射定标产品的不确定度 (Liu 等, 2019; Ma 等, 2020)。最后, 综合数据质量控制后的气溶胶光学厚度、水汽含量、地表反射率光谱等参数生成 BOA 标准辐射定标产品。

2.3.3 TOA 标准辐射定标产品计算

TOA 标准辐射定标产品主要以自动辐射定标场 BOA 标准辐射定标产品为输入, 通过大气辐射传输计算得到卫星高度 TOA 辐亮度, 假设地表朗伯的情况下, 卫星高度 TOA 辐亮度可由如下大气辐射传输方程表示:

$$L_{\text{TOA}}(\lambda) = L_{\text{path}}(\lambda) + \frac{E_{\text{sun}}(\lambda)T(\lambda)\rho_{\text{BOA}}(\lambda)}{(1 - \rho_{\text{BOA}}(\lambda)S(\lambda))\pi} \quad (2)$$

式中, $L_{\text{TOA}}(\lambda)$ 为 TOA 辐亮度, $T(\lambda)$ 是大气路径总透过率, $L_{\text{path}}(\lambda)$ 是程辐射, $\rho_{\text{BOA}}(\lambda)$ 是地表反射率, $S(\lambda)$ 是大气下行反照率, $E_{\text{sun}}(\lambda)$ 是大气层外太阳辐照度。此外, 基于输入的 BOA 标准辐射产品的各项不确定度, 采用蒙特卡洛模拟方法计算得到 TOA 辐亮度不确定度 (Liu 等, 2019; Bouvet 等, 2019; Ma 等, 2020)。

2.4 考虑地表 BRDF 特性的 GF-6/WFV 定标方法

根据 GF-6/WFV 过境自动辐射定标场的日期和时间, 自动匹配 TOA 标准辐射定标产品, 将 GF-6/WFV 载荷光谱响应函数与匹配的 TOA 标准辐射定标产品按照式 (3) 进行卷积运算得到 GF-6/WFV 载荷的 TOA 通道辐亮度,

$$L_{\text{TOA}}^{\text{VZA}=0}(i) = \frac{\int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} L_{\text{TOA}}(\lambda) f_i(\lambda) d\lambda}{f_i(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

式中, $L_{\text{TOA}}^{\text{VZA}=0}(i)$ 是卫星载荷对应通道 i 的 TOA 辐亮度, $f_i(\lambda)$ 是卫星载荷对应通道 i 的光谱响应函数,

λ_{min} 和 λ_{max} 分别是卫星载荷通道 i 的光谱响应函数对应的最小和最大波长。

由于 GF-6/WFV 的观测视场较大, 在对其进行在轨绝对辐射定标时, 需要考虑定标场地的地表二向反射特性带来的角度效应问题 (Yang 等, 2020)。对于大角度观测的 GF-6/WFV 数据, 无法直接利用式 (3) 基于自动辐射定标产品计算得到的天顶观测条件下的 GF-6/WFV 载荷 TOA 通道辐亮度进行绝对辐射定标。因此, 需要根据 GF6/WFV 载荷成像时刻的太阳天顶角和方位角以及观测天顶角和方位角, 结合定标场地的二向反射分布函数 (BRDF), 计算得到对应 GF-6/WFV 载荷观测几何一致的地表反射率。对于不同观测几何条件下的地表二向反射分布函数可由式 (4) 的 Roujean 半经验核驱动模型表示 (Roujean 等, 1992):

$$\rho(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda) = f_{\text{iso}}(\lambda) + f_{\text{vol}}(\lambda)K_{\text{vol}}(\theta_s, \theta_v, \varphi) + f_{\text{geo}}(\lambda)K_{\text{geo}}(\theta_s, \theta_v, \varphi) \quad (4)$$

式中, K_{vol} 和 K_{geo} 分别表示体散射核和几何光学核, 这 2 个参数基于观测几何参数即可计算得到 (Roujean 等, 1992); f_{iso} 、 f_{vol} 和 f_{geo} 分别表示各向同性散射、体散射和几何光学散射核的权重系数;

为了构建包头场沙地自然场景的 BRDF 模型, 利用多角度观测架搭载 SVC HR-1024I 便携式地物光谱仪在当地时间上午 10 点到下午 3 点之间测量了不同观测角度条件下的沙地自然场景的双向反射因子, 具体的测量条件是: 观测天顶角测量范围为 0° — 40° (测量间隔为 10°), 相对方位角为 0° — 360° (测量间隔为 30°)。基于地面测量的沙地自然场景的多角度双向反射因子和对应的观测几何参数, 通过最小二乘拟合计算得到式 (4) 的 3 个各向同性散射、体散射和几何光学散射核的权重系数模型, 同时计算得到 BRDF 模型拟合误差小于 2.1% (Gao 等, 2020)。

基于构建的包头场沙地自然场与 BRDF 模型, 计算得到天顶观测地表反射率 ($\rho_{\text{BOA}}^{\text{VZA}=0}(\lambda)$) 和 GF-6/WFV 实际观测角度条件下的地表反射率 ($\rho_{\text{BOA}}^{\text{VZA}\neq 0}(\lambda)$); 然后, 通过 MODTRAN 5 大气辐射传输分别模拟计算得到天顶观测和实际观测角度条件下对应的 GF-6/WFV 载荷通道 TOA 辐亮度 ($R_{\text{TOA}}^{\text{VZA}=0}(i)$ 和 $R_{\text{TOA}}^{\text{VZA}\neq 0}(i)$); 再结合式 (5) 基于自动辐射定标产品计算得到的天顶观测条件下的 GF-6/WFV 载荷 TOA 辐亮度 ($L_{\text{TOA}}^{\text{VZA}=0}(i)$), 即可计算得到

GF-6/WFV 实际观测角度条件下的 TOA 通道辐亮度 ($L_{\text{TOA}}^{\text{VZA} \neq 0}(i)$)。

$$L_{\text{TOA}}^{\text{VZA} \neq 0}(i) = L_{\text{TOA}}^{\text{VZA} = 0}(i) \times \frac{R_{\text{TOA}}^{\text{VZA} \neq 0}(i)}{R_{\text{TOA}}^{\text{VZA} = 0}(i)} \quad (5)$$

在计算得到 GF-6/WFV 实际观测角度条件下的 TOA 通道辐亮度 ($L_{\text{TOA}}^{\text{VZA} \neq 0}(i)$) 后, 结合 GF-6/WFV 载荷在自动辐射定标场成像数据中提取的量化数值 ($DN(i)$), 由如下式 (6) 计算得到 GF-6/WFV 载荷的在轨绝对辐射定标系数,

$$G(i) = \frac{L_{\text{TOA}}^{\text{VZA} \neq 0}(i)}{DN(i)} \quad (6)$$

式中, $G(i)$ 为 GF-6/WFV 载荷对应通道 i 的在轨绝对辐射定标系数, 单位为 $\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}/\text{sr}$ 。

3 定标结果及分析

3.1 高频次定标结果及不确定度分析

基于本文介绍的 GF-6/WFV 载荷自动辐射定标方法, 计算得到了 2019 年—2021 年期间 GF-6 卫星过境自动辐射定标场的 WFV 载荷时序绝对辐射定标系数, 结果如图 7 所示, 图中实心点代表基于不同定标场的时序定标结果。对 GF-6/WFV 时序定标结果进行不确定度分析, 基于自动辐射定标场的定标结果不确定度主要来源于定标场地表反射率、气溶胶光学厚度、大气柱水汽含量、气溶胶类型、太阳辐射照度以及大气辐射传输模型计算等因素。其中, 定标场地表反射率的不确定度贡献主要来源于地表反射率测量不确定度和场地均一性不确定度, 其合成不确定度小于 3% (Ma 等, 2020); 气溶胶光学厚度和水汽含量的不确定度主要来自 AERONET 产品反演的不确定度 (Holben 等, 1998); 气溶胶类型主要分析了乡村型气溶胶类型和沙尘型气溶胶类型对定标结果的不确定度贡献; 本文采用的大气辐射传输模型 MODTRAN-5 对定标结果不确定度的贡献为 2% (Berk 等, 2011); 太阳辐射照度对定标结果的不确定度贡献小于 1.5% (Thuillier 等, 1998, 2003)。

假设定标系数 ϕ 是定标场地表反射率、气溶胶光学厚度、大气柱水汽含量、气溶胶类型等不确定因素 x, y, \dots, u 的非线性关系:

$$\phi = F(x, y, \dots, u) \quad (7)$$

则定标系数 ϕ 的标准偏差 σ_ϕ 与不确定度因素 x, y, \dots, u 的标准偏差 $\sigma_x, \sigma_y, \dots, \sigma_u$ 之间的关

系为,

$$\begin{aligned} \sigma_\phi^2 = & \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \right)^2 \sigma_y^2 + \dots + \\ & \left(\frac{\partial F}{\partial u} \right)^2 \sigma_u^2 + 2 \frac{\partial F}{\partial x} \frac{\partial F}{\partial y} \rho_{xy} \sigma_x \sigma_y + \dots + \\ & 2 \frac{\partial F}{\partial x} \frac{\partial F}{\partial u} \rho_{xu} \sigma_x \sigma_u + \dots + \\ & 2 \frac{\partial F}{\partial y} \frac{\partial F}{\partial u} \rho_{yu} \sigma_y \sigma_u + \dots \end{aligned} \quad (8)$$

假设定标场地表反射率、气溶胶光学厚度、大气柱水汽含量、气溶胶类型等不确定因素之间是相互独立的, 则其不确定度可由如下公式表示:

$$\sigma_\phi^2 = \left(\frac{\partial F}{\partial x} \sigma_x \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \sigma_y \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial u} \sigma_u \right)^2 \quad (9)$$

式中, $\frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y}, \dots, \frac{\partial F}{\partial u}$ 是各因素的不确定度传递系数, 并通过其将定标场地表反射率、气溶胶光学厚度、大气柱水汽含量、气溶胶类型等不确定因素的误差传递到定标系数 ϕ , 不同因素对定标系数 ϕ 的不确定度贡献分别为 $\sigma_1 = \frac{\partial F}{\partial x} \sigma_x, \sigma_2 =$

$\frac{\partial F}{\partial y} \sigma_y, \dots, \sigma_u = \frac{\partial F}{\partial u} \sigma_u$, 则定标结果的总不确定度 σ_ϕ 可由如下公式计算得到,

$$\sigma_\phi = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_u^2} \quad (10)$$

基于上述误差传递理论计算得到定标场地表反射率、气溶胶光学厚度、大气柱水汽含量、气溶胶类型等不确定度因素对时间序列上定标结果总体不确定度的贡献, 结果如图 7 所示, 图中误差棒是 GF-6/WFV 载荷各波段的定标结果不确定度。包头场、美国 Railroad Playa 场、法国 La Crau 场、欧空局 Gobabeb 场的不确定度分别用不同颜色的误差棒表示。对时间序列的不确定度分析结果进行统计, 计算得到 GF-6/WFV 载荷各波段的时序不确定度均值分别为 4.04%、4.24%、4.31%、3.82%、4.15%、4.31%、6.00%、4.48%。统计结果表明, 除 GF-6/WFV 载荷第 7 波段外, 其他各波段的在轨绝对辐射定标系数平均不确定度小于 5%。由于自动辐射定标场使用的地物光谱仪在 400 nm—460 nm 波段范围内因内部杂光带来的不确定度为 5.91%~25.98% (Ma 等, 2020), 而 GF-6/WFV 第 7 波段光谱响应函数正好覆盖 400 nm—460 nm 波长范围, 导致第 7 波段绝对辐射定标不确定度相对偏大。

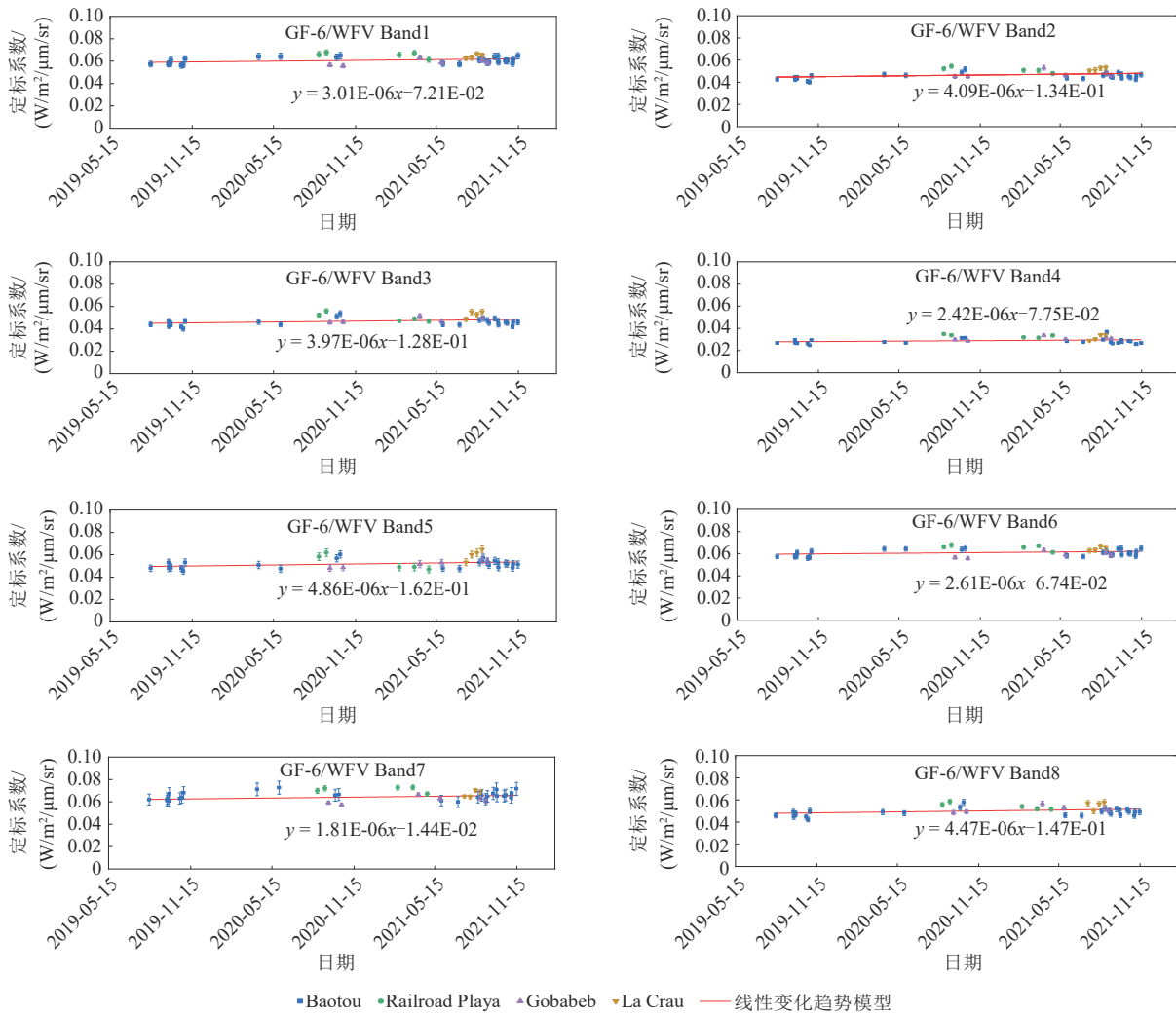


图7 GF-6/WFV 载荷高频次绝对辐射定标结果及其不确定度和变化趋势分析

Fig. 7 Uncertainties and trend analysis of the GF-6/WFV sensors' high frequency absolute radiometric calibration results.

3.2 载荷辐射性能趋势变化分析

对 GF-6/WFV 载荷时间序列上的绝对辐射定标系数均值和标准偏差进行统计分析，用于表征 2019 年 8 月 14 日至 2022 年 4 月 19 日时间范围内的 41 个样本结果所有定标结果的离散程度，标准差越小代表载荷辐射性能越稳定，结果如图 8 所示。图中纵坐标的实心方点代表 GF-6/WFV 各波段时间序列上的绝对辐射定标系数均值，分别为 0.0612、0.0469、0.0473、0.0295、0.0523、0.0482、0.0657 和 0.0504；误差棒代表 GF-6/WFV 各波段时间序列上的绝对辐射定标系数标准差，分别为 0.0034、0.0035、0.0038、0.0029、0.0047、0.0044、0.0041 和 0.0040。统计分析结果表明，GF-6/WFV 载荷各波段时间序列上的绝对辐射定标系数总体相对平稳。

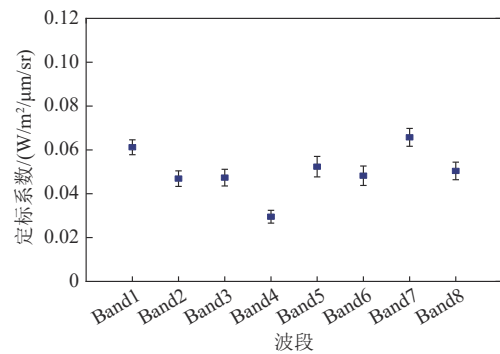


图8 GF-6/WFV 绝对辐射定标系数稳定性分析

Fig. 8 Stability analysis of GF-6/WFV calibration coefficient time series

对 GF-6/WFV 载荷各波段时间序列上的绝对辐射定标系数进行线性拟合，得到绝对辐射定标系数随时间的趋势变化模型（图 7）。采用年变化率 D_{annual} 指标（陈林等，2016；Zhong 等，2021）

对 GF-6/WFV 载荷辐射性能变化进行评价分析, 计算公式为

$$D_{\text{annual}} = \frac{D_{\text{total}}}{x_{\text{end}} - x_1} \times 365 \quad (11)$$

式中, D_{total} 为载荷在一定时间范围内的总衰减率, 其计算公式如下,

$$D_{\text{total}} = \frac{f(x_1) - f(x_{\text{end}})}{f(x_1)} \times 100\% \quad (12)$$

式中, f 为线性拟合得到的载荷辐射性能变化趋势模型, x_1 和 x_{end} 分别为参与载荷辐射性能变化趋势模型拟合的样本数据的第 1 天和最后 1 天。基于趋势变化模型计算得到 GF-6/WFV 各波段绝对辐射定标系数的年变化率分别为 1.52%、1.11%、1.13%、1.14%、1.10%、1.41%、4.59% 和 1.11%。

3.3 定标结果交叉验证分析

为了检验本文基于自动辐射定标场的 GF6/WFV 载荷定标结果的可靠性, 选用国际上公认的高精度在轨卫星载荷 MODIS 和 Sentinel-2/MSI 对 GF-6/WFV 卫星载荷辐射定标结果进行交叉验证分析, MODIS 和 Sentinel-2/MSI 载荷的星上定标不确定度分别为 2% (Xiong 等, 2008) 和 5% (Revel 等, 2019)。由于 MODIS 和 Sentinel-2/MSI 参考载荷和 GF-6/WFV 载荷的第 5 波段到第 8 波段之间没有合适的匹配波段, 所以本文只对 GF-6/WFV 载荷的第 1 波段到第 4 波段进行交叉验证分析。此外, 选择青海格尔木大灶火东戈壁、敦煌定标场戈壁以及包头场沙地作为交叉验证的地面参考场景。在选取的交叉验证场景, 分别匹配了目标载荷和参考载荷过境各交叉验证场时间差异在 1 h 内, 观测天顶角差异小于 10° 的匹配数据, 其中, GF-6/WFV 和 MODIS 在青海格尔木戈壁成功匹配的影像有 8 对、GF-6/WFV 和 Sentinel-2/MSI 在敦煌定标场戈壁、格尔木以及包头场沙地成功匹配的影像有 5 对。对成功匹配的影像数据, 将参考载荷对应交叉验证场景的观测值通过光谱匹配的方式转换到目标载荷 GF-6/WFV 载荷各波段 TOA 辐亮度, 将其作为参考对基于本文自动辐射定标系数计算的 TOA 辐亮度进行交叉验证, 计算二者相对误差, 结果如图 9 和图 10 所示。从图中交叉验证结果可以看出, 以 MODIS 和 Sentinel-2/MSI 为参考载荷的 GF-6/WFV 载荷交叉验证结果的相对差异总体上分布在正负 10% 以内, 其中, 以 MODIS 为参考载荷的

GF-6/WFV 第 1 波段、第 2 波段、第 3 波段以及第 4 波段的相对差异绝对平均值分别为 3.14%、3.63%、3.52% 和 6.09%; 以 Sentinel-2/MSI 为参考载荷的 GF-6/WFV 第 1 波段、第 2 波段、第 3 波段以及第 4 波段的相对差异绝对平均值分别为 3.92%、2.12%、2.68% 和 2.56%; 说明基于自动辐射定标场的 GF-6/WFV 载荷辐射定标结果稳定可靠。

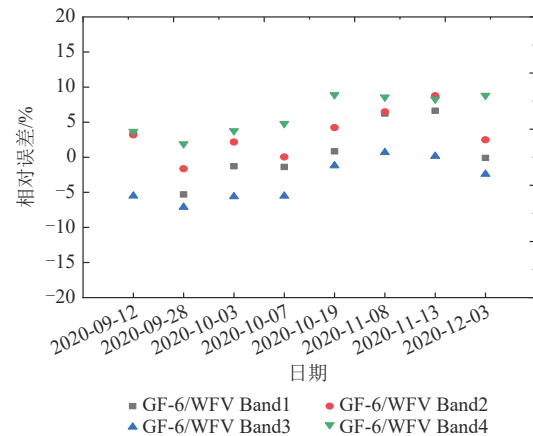


图9 以 MODIS 为参考载荷的 GF-6/WFV 载荷交叉验证结果
Fig. 9 Cross validation of GF-6/WFV automatic calibration results with MODIS

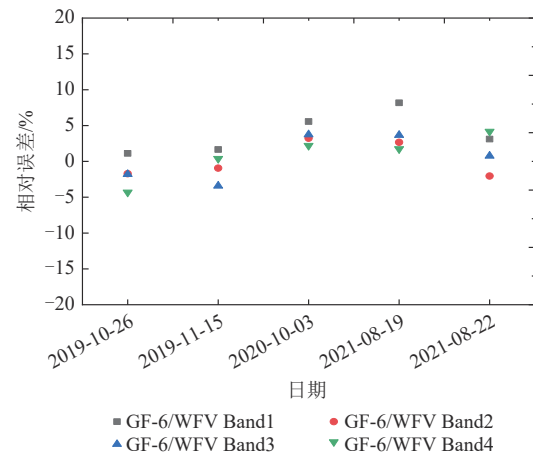


图10 以 Sentinel-2/MSI 为参考载荷的 GF-6/WFV 载荷交叉验证结果
Fig. 10 Cross validation of GF-6/WFV automatic calibration results with Sentinel-2/MSI

4 结论

本文面向国产高分共性产品生产对载荷高精度、高频次在轨绝对辐射定标的实际需求, 同时针对国产 GF-6/WFV 载荷大角度观测特点, 介绍了利用自动辐射定标场的 GF-6/WFV 载荷在轨时序绝对辐射定标和趋势分析方法。基于该方法实

现了2019年8月至2021年10月期间过境自动辐射定标场的GF-6/WFV载荷的时序绝对辐射定标,且载荷各波段(第7波段除外)时序定标结果的总体不确定度优于5%,时序定标结果趋势分析得到GF-6/WFV载荷各波段辐射定标系数年变化在-1.10%—4.59%。此外,以国际上高精度卫星MODIS和Sentinel-2/MSI载荷为参考,对定标结果进行了交叉验证的结果表明,GF-6/WFV载荷各波段的相对差异绝对平均值在2.12%—6.09%。

本文提出的基于自动辐射定标场的高分六号宽幅载荷时序绝对辐射定标方法,不仅可以通过显著提升载荷在轨定标频次实现卫星载荷辐射性能的时序趋势变化持续跟踪,而且能够提供可量化的时序定标结果不确定度,以有效支撑国产高分共性遥感产品生产和提升国产遥感数据定量化应用水平。

志 谢 本文使用的国产高分六号宽幅载荷数据来源于中国科学院空天信息创新研究院科学数据中心网站、MODIS数据来源于NASA的LAADS DAAC网站、Sentinel-2/MSI数据来源于ESA的SCIHUB网站,在此一并表示感谢!

参考文献(References)

- Alhammoud B, Jackson J, Clerc S, Arias M, Bouzinac C, Gascon F, Cadau E G, Iannone R Q and Boccia V. 2019. Sentinel-2 level-1 radiometry assessment using vicarious methods from DIMITRI toolbox and field measurements from RadCalNet database. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(9): 3470-3479 [DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2936940]
- Barsi J A, Alhammoud B, Czapla-Myers J, Gascon F, Haque O, Kaewmanee M, Leigh L and Markham B L. 2018. Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI radiometric cross comparison over desert sites. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1): 822-837 [DOI: 10.1080/22797254.2018.1507613]
- Berk A, Anderson G P, Acharya P K and Shettle E P. 2011. MODTRAN@5.2.2 User's Manual. Burlington: Spectral Sciences, Inc
- Bouvet M, Thome K, Berthelot B, Bialek A, Czapla-Myers J, Fox N P, Goryl P, Henry P, Ma L L, Marcq S, Meygret A, Wenny B N and Woolliams E R. 2019. RadCalNet: a radiometric calibration network for earth observing imagers operating in the visible to short-wave infrared spectral range. *Remote Sensing*, 11(20): 2401 [DOI: 10.3390/rs11202401]
- Chen L, Xu N, Hu X Q, Lu F and Zhang P. 2016. Study on orbit radiometric calibration for FY-2 visible band based on deep convective cloud. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 36(8): 2639-2645 (陈林, 徐娜, 胡秀清, 陆风, 张鹏. 2016. 基于深对流云目标的风云二号可见光通道辐射定标. *光谱学与光谱分析*, 36(8): 2639-2645) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2016)08-2639-07]
- Czapla-Myers J and Anderson N. 2020. Calibration and validation of earth-observing sensors using the radiometric calibration test site (RadCaTS) at Railroad Valley, Nevada, USA//22nd EGU General Assembly: EGU [DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-20557]
- Czapla-Myers J, McCorkel J, Anderson N, Thome K, Biggar S, Helder D, Aaron D, Leigh L and Mishra N. 2015. The ground-based absolute radiometric calibration of landsat 8 OLI. *Remote Sensing*, 7(1): 600-626 [DOI: 10.3390/rs70100600]
- Czapla-Myers J S, Thome K J and Leisso N P. 2010. Radiometric calibration of earth-observing sensors using an automated test site at Railroad Valley, Nevada. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36(5): 474-487 [DOI: 10.5589/m10-076]
- Gao C X, Liu Y K, Liu J R, Ma L L, Wu Z F, Qiu S, Li C R, Zhao Y G, Han Q J, Zhao E Y, Qian Y G and Wang N. 2020. Determination of the key comparison reference value from multiple field calibration of Sentinel-2B/MSI over the Baotou site. *Remote Sensing*, 12(15): 2404 [DOI: 10.3390/rs12152404].
- Gong H, Tian G L, Yu T, Gu X F, Gao H L and Li X Y. 2010. Vicarious radiometric calibration and validation of CBERS02B CCD data. *Journal of Remote Sensing*, 14(1): 1-12 (巩慧, 田国良, 余涛, 顾行发, 高海亮, 李小英. 2010. CBERS02B卫星CCD相机在轨辐射定标与真实性检验. *遥感学报*, 14(1): 1-12) [DOI: 10.11834/jrs.20100101]
- Holben B N, Eck T F, Slutsker I, Tanré D, Buis J P, Setzer A, Vermote E, Reagan J A, Kaufman Y J, Nakajima T, Lavenu F, Jankowiak I and Smirnov A. 1998. AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66(1): 1-16 [DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00031-5]
- Huang J W, Li Z Y, Chen E X, Zhao L and Mo B P. 2021. Classification of plantation types based on WFV multispectral imagery of the GF-6 satellite. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(2): 539-548 (黄建文, 李增元, 陈尔学, 赵磊, 莫冰萍. 2021. 高分六号宽幅多光谱数据人工林类型分类. *遥感学报*, 25(2): 539-548) [DOI: 10.11834/jrs.20219090]
- Jing X, Leigh L, Pinto C T and Helder D. 2019. Evaluation of RadCalNet output data using Landsat 7, Landsat 8, Sentinel 2A, and Sentinel 2B sensors. *Remote Sensing*, 11(5): 541 [DOI: 10.3390/rs11050541]
- Kim K and Lee K. 2020. Validation experiment of the reflectance products of KOMPSAT-3A based on RadCalNet data and its applicability to vegetation indexing. *Remote Sensing*, 12(23): 3971 [DOI: 10.3390/rs12233971]
- Li C R, Ma L L, Tang L L, Gao C X, Qian Y G, Wang N and Wang X H. 2021. A comprehensive calibration site for high resolution remote sensors dedicated to quantitative remote sensing and its applications. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 198-219 (李传荣, 马灵玲, 唐伶俐, 高彩霞, 钱永刚, 王宁, 王新鸿. 2021. 面向定量遥感的高分辨遥感综合定标场及其应用. *遥感学报*, 25(1): 198-219) [DOI: 10.11834/jrs.20210326]

- Li W, Ma L L, Zhao Y G, Liu Y K, Wang N, Qian Y G, Li K, Li C R and Tang L L. 2021. Temporal vicarious radiometric calibration of ZY-3 Mux sensor using automatic ground measurement of Baotou sandy site in China//Proceedings of 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Brussels: IEEE: 7767-7770 [DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9554201].
- Li X Y, Tian X, Duan T, Cao X M, Yang K J, Lu Q and Wang F. 2021. From UAV to satellite: fractional woody and herbaceous vegetation cover estimation in the temperate sparse forest grassland based on machine learning algorithm. *Journal of Remote Sensing* (李晓雅, 田昕, 段涛, 曹晓明, 杨凯捷, 卢琦, 王锋. 2021. 从无人机到卫星——基于机器学习的温带疏林草原木本和草本植被盖度估算. 遥感学报) [DOI: 10.11834/jrs.20210605]
- Li Y, Rong Z G, Li Y Q, Zhang Y, Ba X T, Zhang Y N, Chen L, Zhang L J, Wei W and Sun L. 2019. Solar reflection band site automatic calibration by the Dunhuang site automatic observation radiometric calibration operational system//Proceedings of SPIE 11127, Earth Observing Systems XXIV. San Diego: SPIE: 111271M [DOI: 10.1117/12.2528375]
- Liang J, Zheng Z W, Xia S T, Zhang X T and Tang Y Y. 2020. Crop recognition and evaluation using red edge features of GF-6 satellite. *Journal of Remote Sensing*, 24(10): 1168-1179 (梁继, 郑镇炜, 夏诗婷, 张晓彤, 唐媛媛. 2020. 高分六号红边特征的农作物识别与评估. 遥感学报, 24(10): 1168-1179) [DOI: 10.11834/jrs.20209289]
- Liu Y K, Li C R, Ma L L, Wang N, Qian Y G and Tang L L. 2017. An automatic reflectance-based approach to vicarious radiometric calibrate the Landsat8 operational land imager//Proceedings of 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Fort Worth: IEEE: 4699-4702 [DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8128051]
- Liu Y K, Ma Z H, Ma L L, Wang N, Qian Y G, Li C R and Tang L L. 2018. Vicarious radiometric calibration using a ground radiance-based approach: a case study of Sentinel 2A MSI//Proceedings of 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia: IEEE: 3296-3299 [DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517883]
- Liu Y K, Ma L L, Wang N, Zhao Y G, Gao C X, Li C R and Tang L L. 2019. Uncertainty analysis of vicarious radiometric calibration of optical sensor using a Monte Carlo statistical approach//Proceedings of SPIE 11127, Earth Observing Systems XXIV. San Diego: SPIE: 111271O [DOI: 10.1117/12.2527979]
- Lü J Y, He M Y, Chen L, Hu X Q and Li X. 2017. Automated radiation calibration method based on Dunhuang radiometric calibration site. *Acta Optica Sinica*, 37(8): 0801003 (吕佳彦, 何明元, 陈林, 胡秀清, 李新. 2017. 基于敦煌辐射校正场的自动化辐射定标方法. 光学学报, 37(8): 0801003) [DOI: 10.3788/AOS201737.0801003]
- Ma L L, Zhao Y G, Woolliams E R, Dai C H, Wang N, Liu Y K, Li L, Wang X H, Gao C X, Li C R and Tang L L. 2020. Uncertainty analysis for RadCalNet instrumented test sites using the Baotou sites BTCN and BSCN as examples. *Remote Sensing*, 12(11): 1696 [DOI: 10.3390/rs12111696]
- Marcq S, Meygret A, Bouvet M, Fox N, Greenwell C, Scott B, Berthelot B, Besson B, Guillemainot N and Damiri B. 2018. New radcalnet site at gobabeb, namibia: installation of the instrumentation and first satellite calibration results//Proceedings of 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia: IEEE: 6444-6447 [DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517716]
- Meygret A, Santer R P and Berthelot B. 2011. ROSAS: a robotic station for atmosphere and surface characterization dedicated to on-orbit calibration//Proceedings of SPIE 8153, Earth Observing Systems XVI. San Diego: SPIE: 815311 [DOI: 10.1117/12.892759]
- Pang B, Ma L L, Liu Y K, Wang N, Zhao Y G, Han Q J, Meng F R, Li C R, Tang L L, Chen Z M and Wang G Z. 2019. Ground-based automatic radiometric calibration of land observation satellite optical sensors and cross validation analysis. *Remote Sensing Technology and Application*, 34(1): 146-154 (庞博, 马灵玲, 刘耀开, 王宁, 赵永光, 韩启金, 孟凡荣, 李传荣, 唐伶俐, 陈志明, 王国珠. 2019. 陆地卫星光学载荷地基自动辐射定标与验证分析. 遥感技术与应用, 34(1): 146-154) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2019.1.0146]
- Qiu G G, Li X, Wei W, Zhang Q and Zheng X B. 2016. Experiment and analysis of on-orbit radiometric calibration for remote sensors based on in-site automated observation technology. *Acta Optica Sinica*, 36(7): 0701001 (邱刚刚, 李新, 韦玮, 张权, 郑小兵. 2016. 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. 光学学报, 36(7): 0701001) [DOI: 10.3788/AOS201636.0701001]
- Revel C, Lonjou V, Marcq S, Desjardins C, Fougne B, Luche C C D, Guillemainot N, Lacamp A S, Lourme E, Miquel C and Lenot X. 2019. Sentinel-2A and 2B absolute calibration monitoring. *European Journal of Remote Sensing*, 52(1): 122-137 [DOI: 10.1080/22797254.2018.1562311]
- Roujean J L, Leroy M and Deschamps P Y. 1992. A bidirectional reflectance model of the earth's surface for the correction of remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 97(D18): 20455-20468 [DOI: 10.1029/92JD01411]
- Santer R P, Six C and Buis J. 2003. Vicarious calibration on land site using automatic ground-based optical measurements: applications to SPOT-HRV//Proceedings of SPIE 4891, Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds III. Hangzhou: SPIE [DOI: 10.1117/12.467562]
- Schmechtig C, Santer R P, Roger J C and Meygret A. 1997. Automatic ground-based station for vicarious calibration//Proceedings of SPIE 3221, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites. London: SPIE [DOI: 10.1117/12.298097].
- Sterckx S and Wolters E. 2019. Radiometric top-of-atmosphere reflectance consistency assessment for Landsat 8/OLI, Sentinel-2/MSI, PROBA-V, and DEIMOS-1 over Libya-4 and RadCalNet calibration sites. *Remote Sensing*, 11(19): 2253 [DOI: 10.3390/rs11192253]
- Tang H Z, Tang X M, Xie J F, Chen W and Qian Y G. 2022. On-orbit radiometric calibration and validation of GF-7 satellite based on RadCalNet Baotou site. *National Remote Sensing Bulletin* (唐洪钊, 唐新明, 谢俊峰, 陈伟, 钱永刚. 2022. 基于RadCalNet包头场的高分七号卫星在轨绝对辐射定标及精度验证. 遥感学报) [DOI: 10.11834/jrs.20221692]
- Thuillier G, Hersé M, Labs D, Foujols T, Peetermans W, Gillotay D, Simon P C and Mandel H. 2003. The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer

- from the Atlas and Eureka Missions. *Solar Physics*, 214(1): 1-22 [DOI: 10.1023/A:1024048429145]
- Thuillier G, Hersé M, Simon P C, Labs D, Mandel H, Gillotay D and Foujols T. 1998. The visible solar spectral irradiance from 350 to 850 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer during the atlas I mission. *Solar Physics*, 177(1/2): 41-61 [DOI: 10.1023/A:1004953215589]
- Wang N, Li C R, Ma L L, Liu Y K, Meng F R, Zhao Y G, Pang B, Qian Y G, Li W, Tang L L and Wang D J. 2017. Ground-based automated radiometric calibration system in Baotou site, China//Proceedings of SPIE 10427, Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII. Warsaw: SPIE: 104271J [DOI: 10.1117/12.2278072]
- Xiong X X, Chiang K F, Wu A S, Barnes W L, Guenther B and Salomonson V V. 2008. Multiyear on-orbit calibration and performance of Terra MODIS thermal emissive bands. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(6): 1790-1803 [DOI: 10.1109/tgrs.2008.916217]
- Yang A X, Zhong B, Hu L F, Wu S L, Xu Z P, Wu H B, Wu J J, Gong X S, Wang H B and Liu Q H. 2020. Radiometric cross-calibration of the wide field view camera onboard GaoFen-6 in multispectral bands. *Remote Sensing*, 12(6): 1037 [DOI: 10.3390/rs12061037]
- Zhang M, Wei W, Zhang Y N, Zhao C Y, Li X and Zheng X B. 2019. High-frequency on-orbit radiometric calibration of SNPP VIIRS based on in-site automated observation technology. *Acta Photonica Sinica*, 48(4): 0428001 (张孟, 韦玮, 张艳娜, 赵春艳, 李新, 郑小兵. 2019. 基于场地自动化观测技术的SNPP VIIRS高频次在轨辐射定标. *光子学报*, 48(4): 0428001) [DOI: 10.3788/gzxb20194804.0428001]
- Zhong B, Ma Y B, Yang A X and Wu J J. 2021. Radiometric performance evaluation of FY-4A/AGRI based on Aqua/MODIS. *Sensors*, 21(5): 1859 [DOI: 10.3390/s21051859]

Time-series absolute radiometric calibration and trend analysis of the wide swath sensor onboard GF-6 satellite with automatic radiometric calibration site

LIU Yaokai¹, MA Lingling¹, WANG Renfei¹, ZHENG QingChuan², SONG Peilan¹, LI Wan¹, ZHAO Yongguang¹, WANG Ning¹, GAO Caixia¹, HOU Xiaoxin², JIN Jin²

1. Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing Information Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. Inner Mongolia North Heavy Industry Group Co., Ltd, Baotou 014033, China

Abstract: The on-orbit absolute radiometric calibration of satellite remote sensing payloads is crucial to ensuring the radiometric consistency of products from different sources and improving the inversion accuracy of high spatial resolution products. The traditional site calibration method based on manual synchronous measurement is limited by the imaging, surface and atmospheric measurement conditions at the time of satellite overpassing, which is difficult to meet the needs of correcting the radiometric performance change accurately during the life cycle. In this paper, according to the characteristics of large viewing angle observation of the wide width sensor onboard GaoFen6 satellite (GF-6/WFV), a time series absolute radiometric calibration method for the GF-6/WFV sensor with automatic radiometric calibration site is proposed. The proposed method not only can track the trend of satellite payload radiation performance by significantly increasing the frequency of on-orbit calibration, but also can give the calibration results with uncertainties. Based on proposed method, 41 of frequencies automatic radiometric calibration results of GF-6/WFV sensor were calculated from August 2019 to October 2021, and the traceability uncertainty of the calibration results was better than 5% (except for the 7th band). The trend analysis of the time series calibration results shows that the annual variation of the radiometric calibration coefficients of the GF-6/WFV sensor are from 1.10% to 4.59%. In addition, the high-precision in-orbit satellite payloads MODIS and Sentinel-2/MSI are used as reference to cross validate the GF-6/WFV sensor's calibration results. And, the averaged absolute relative differences of the cross validation were between 2.12% to 6.09% respect to the bands 1 to 4 of GF-6/WFV sensor. The proposed method in this paper can realize the time-series on-orbit absolute radiometric calibration of the GF-6/WFV sensor and its radiometric performance trend change monitoring during the whole life cycle, which can effectively support the production of high spatial resolution remote sensing products and improve the quantitative application level of Chinese remote sensing data.

Key words: time-series radiometric calibration, GF-6/WFV, uncertainty analysis, trend analysis, cross calibration

Supported by Aerospace Information Research Institute of Chinese Academy of Sciences (No. E0Z206030F); Youth Innovation Promotion Association CAS (No. 2021118)