

星载光学载荷历史数据再定标综述

胡秀清^{1,2,3}, 王玲^{1,2,3}, 张鹏^{1,2,3}, 徐娜^{1,2,3}, 漆成莉^{1,2,3}, 徐寒列^{1,2,3},
何兴伟^{1,2,3}, 何玉青⁴, 陈林^{1,2,3}, 孙凌^{1,2,3}, 卢乃锰^{1,2,3}

1. 国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心) 中国气象局, 北京 100081;
2. 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室 中国气象局, 北京 100081;
3. 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081;
4. 光电成像技术与系统教育部重点实验室 北京理工大学, 北京 100081

摘要: 经过三十多年努力, 中国气象、陆地、海洋、环境减灾星座等已经形成了系列化、业务化发展的态势, 国产多系列遥感卫星积累了较长时间连续观测资料, 这为气候变化研究和环境变化检测提供了可能性。要发挥卫星观测历史数据在气候变化研究中的巨大潜力, 必须解决不同卫星之间、同一卫星全寿命期遥感载荷的高精度一致性辐射再定标问题, 构建统一的历史辐射基准和精细再定标模型, 使得不同仪器、不同时期的观测资料具有可比性。本文综述了星载光学遥感仪器历史数据再定标的方法和思路, 包括发展地球稳定目标和天体月球的辐射基准模型, 重构长序列历史数据再定标精细算法模型。论文系统介绍了如何构建历史数据再定标的地球稳定目标—沙漠、冰雪、深对流云(DCC)等辐射基准模型, 以及用于交叉定标及基准溯源的典型参考仪器及基准数据评价。本文还综述了光学载荷历史数据再定标模型重构需要综合考虑的几个关键方面, 包括影响辐射定标不确定性的杂散光、串光、偏振等要素的影响机理, 并采用仪器定标全链路仿真和关键定标参数精细重构, 建立仪器响应的短周期波动订正模型和长周期衰变模型; 构建仪器响应与空间、光谱、热学、轨道等内外要素关联的精细定标机理模型; 开展仪器响应的多目标跟踪和长序列宽动态综合定标系数推算, 并采用计算智能的相对定标技术, 实现卫星长序列历史资料的自动再定标和长周期衰减订正, 建立同一仪器寿命期内辐射响应及衰变特征模型。本文综述的历史辐射基准、再定标模型及定标的影响机理等最新研究进展, 为中国历史遥感数据再定标提供了系统性解决思路, 为进一步提高遥感数据长期定标质量和可靠性奠定了理论方法基础。

关键词: 历史数据再定标, 辐射基准, 精细再定标模型, 仪器衰变模型, 定标机理模型

中图分类号: P2

引用格式: 胡秀清, 王玲, 张鹏, 徐娜, 漆成莉, 徐寒列, 何兴伟, 何玉青, 陈林, 孙凌, 卢乃锰. 2023. 星载光学载荷历史数据再定标综述. 遥感学报, 27(10): 2229-2251

Hu X Q, Wang L, Zhang P, Xu N, Qi C L, Xu H L, He X W, He Y Q, Chen L, Sun L and Lu N M. 2023. Overview of historical data retrospective calibration for space-borne optical payloads. National Remote Sensing Bulletin, 27(10): 2229-2251[DOI:10.11834/jrs.20233359]

1 引言

经过几十年的艰苦努力, 中国风云气象卫星、资源卫星、海洋卫星、环境减灾星座已经形成了系列化、业务化发展的态势(Zhang等, 2019b; Xian等, 2021; 黄树松等, 2021; 林明森等, 2019)。中国遥感卫星已经建立了多系列卫星组网观测的卫星系统, 以及连续稳定运行的卫星地面

应用系统, 实现了从实验星到业务星、从依赖国外数据到自主发射卫星并建立地面接收处理系统的飞跃。同卫星数量发展相比, 国产卫星观测数据质量和精度还有待提高, 早期卫星受研制水平的限制, 遥感仪器信噪比低、星上定标能力弱和稳定性差。近10年来, 中国对地遥感卫星定量观测能力不断提升, 部分卫星增强了星上定标能力, 但星上定标精度和长期稳定性与发达国家仍有较

收稿日期: 2023-08-22; 预印本: 2023-09-13

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2022YFB3902900, 2022YFB3902901, 2018YFB0504901)

第一作者简介: 胡秀清, 研究方向为卫星遥感定标理论及方法, 遥感反演科学算法和遥感大数据应用。E-mail: huxq@cma.gov.cn

通信作者简介: 张鹏, 研究方向为卫星大气遥感及应用、卫星遥感仪器定标、大气辐射传输理论与方法。E-mail: zhangp@cma.gov.cn

大差距。国产卫星具有连续观测近二十年长序列数据,涉及到多个卫星平台的观测结果,每颗卫星的技术性能、运行寿命、定标量参差不齐。因此,深度挖掘应用这些海量数据,首先必须解决长序列和遥感器数据的一致性定标和稳定性问题。目前遥感卫星业务定标得到的基础气候数据集(FCDRs)没有统一的辐射基准和考虑多要素影响的再定标算法,使得后端长时间序列卫星专题数据集(TCDRs)缺乏一致性和连续性,无法满足气候研究关键气候变量(ECVs)需求的完备卫星气候数据集CDR(Bojinski等,2014),阻碍了TCDRs在气候变化和环境变迁研究中的广泛使用(Popp等,2020)。因此突破星载辐射基准的历史溯源与在轨传递技术,解决多卫星平台、多遥感器的统一化辐射定标问题,是实现国产遥感卫星应用于气候观测的关键所在。

开展长时间序列遥感数据的统一化辐射定标再处理方法研究在国际上已经受到广泛重视,并已经取得很好的研究进展。从20世纪90年代开始,国外即开始了遥感器历史资料再定标研究工作,其中最突出的是由美国NOAA和NASA共同发起的PathFinder计划,此项目旨在为全球变化研究和地球系统科学研究提供长时间序列的科学数据集,包括基于地面长期稳定目标(如利比亚沙漠)的场地定标方法,不同遥感器的交叉辐射定标和利用月亮或特定恒星的辐射定标方法(Heidinger等,2010;Molling等,2010)。1992年国际卫星云气候计划(ISCCP)提出重新定义ISCCP定标和分析方案,开始对从1983年开始的美日气象卫星序列(NOAA,GOES和GMS)所有数据进行重新处理,反复调整迭代定标方案和建立新定标表,消除长时间卫星观测数据中的伪变化(Brest和Rossow,1992;Stone等,2013)。21世纪初开始欧盟的哥白尼气候变化服务计划C3S(Copernicus Climate Change Service)中一项重要内容就是针对早期卫星数据的再处理(CDS;<https://cds.climate.copernicus.eu> [2023-08-22]),由欧洲气象卫星组织(EUMETSAT)和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)具体承担,包括数据元信息、数据/算法文档、正演模型、基于参考数据的质量评估、质量标识、偏差估计等众多内容,另外欧洲航空局提出了气候变化倡议CCI(Hollmann等,2013)。SCOPE-CM(Sustained and COordinated Processing of Environmental satellite data

for Climate Monitoring)是2008年在WMO主导下,与GCOS、CGMS、CEOS和GEO联合开展的卫星基本气候变量处理行动计划。综上,欧洲和美国已有较完备的处理流程、标准和机制,并具有针对定标精度、反演算法的稳定性有较为完整的评估分析能力。如美国NOAA国家环境信息中心NCEI(其前身是NCDC)启动了旨在发展和实现一个强有力的、可持续的、科学的、可靠的方法来生产和存储卫星气候资料的CDR计划,即以AVHRR数据为基础,构建了Pathfinder Atmospheres Extended(Patmos-x)数据(Heidinger等,2014),生成长时间序列的卫星气候数据,并实现历史与实时数据的无缝衔接。在SCOPE-CM框架下,EUMETSAT通过SAF(Satellite Application Facility)计划,构建了包含云、大气、海表、陆表等多参数的长时间序列数据集。Brodzik等2016年为DMSP系列卫星所搭载的SSMIS以及SSM/I传感器开展了历史数据再处理工作,从观测点地方时、天线订正以及格点数据重建等方面进行了计算,制作了1978年—2016年的再处理数据集。2002年,NOAA主持召开了用于全球气候变化监测的卫星遥感器气候定标(ASIC3)专题工作组会议(Ohring等,2007),会议指出目前卫星遥感器在轨辐射定标精度远不能满足长期气候变化监测的需要(Fraser和Datla,2006)。为此,2006年,在NOAA/NESDIS的建议下,WMO批准建立空基全球交叉定标系统(GSICS)(Goldberg等,2011),以推动卫星遥感器的在轨辐射定标国际协作研究和方法统一,特别是交叉辐射定标方法研究。这些国际行动提出了长时间全球气候变化监测的卫星仪器定标系统化方案,为后来国际上遥感卫星资料的业务迭代再定标再处理指明了发展方向,最成功的实例莫过于EOS/MODIS业务定标反复再更新,现在已经提供全球用户第6版本C6数据集(Platnick等,2017),C7版本正在测试中。中国自20世纪90年代开始建立以敦煌和青海湖两个场地为主的中国遥感卫星辐射校正技术系统,该技术系统服务于气象、陆地、海洋和环境多个卫星序列光学遥感器的绝对辐射校正(Hu等,2010),但主要是基于年度试验开展的零星辐射校正工作,不能实现在轨遥感器和历史遥感仪器的连续定标和全寿命周期再定标处理。

国内对于历史资料再定标和初级气候产品数据集构建的研究较少,相关研究主要集中在定量

遥感产品气候数据集生产上。2008年曾开展了面向气候应用的气象卫星长序列历史数据集统一辐射再定标技术研究，主要针对国家卫星气象中心1999年以来存储的FY-1C/D L1B资料进行再定标处理（胡秀清，2012）。其中借鉴了国际上提出的多种辐射定标方法（顾行发等，2013；马灵玲等，2023；Arai，2001），包括基于地面长期稳定目标（如利比亚沙漠）的场地定标方法，不同遥感器（极轨—极轨卫星、极轨—静止卫星、静止—静止卫星）的交叉辐射定标和利用月球的辐射定标方法，并取得了可喜的成果。2018年开始在科技部重点研发项目支持下，系统性开展面向国产卫星长时间序列定标研究的辐射基准建立，以及多方案融合综合定标方法和精细化定标模型研究，解决了太阳反射波段长期依赖外场定标技术的限制，发展多目标宽动态范围的太阳反射波段历史再定标技术。针对红外波段重点解决黑体自发射和测温误差、太阳污染以及光谱漂移等一系列影响黑体定标的问题，发展基于黑体自发射模型的热发射波段历史再定标技术。

面向多系列国产遥感卫星光学载荷历史数据一致性辐射再定标共性技术问题，本文系统性论述了长序列历史卫星资料历史定标辐射基准构建方法，介绍如何基于海量大数据挖掘建立光学载荷历史辐射基准，包括各类地球稳定目标辐射基准和月球天体基准，以及国际公认的基准参考仪器。构建同类仪器精细定标物理模型、载荷间辐射基准传递模型和同一仪器寿命期内辐射响应及衰变特征模型，为光学载荷长序列历史数据定标再处理提供科学算法和精度验证方法支撑。

2 光学遥感仪器再定标的历史辐射基准构建

不同于一般意义上的场地定标，卫星历史数据再定标将面临没有辐射校正场星地同步观测的问题，因此，必须通过补救或复盘回溯的技术手段，寻找具有可靠辐射特性的自然稳定目标作为历史资料再定标的有效辐射源。目前国际上常用的稳定目标主要有月球和恒星为代表的天体目标，以及深对流云、稳定沙漠场、永久冰川、海洋耀斑、干洁海洋瑞利散射等地球稳定目标。我们先后发展了基于地球表面、空中云团和地外天体等稳定目标的卫星在轨替代定标技术，甄选补充了

中国境内的地球稳定目标场和目标特征建模，为光学载荷高频次、宽动态覆盖、高精度的历史数据再定标提供历史辐射基准。

非洲、南美洲以及中国西北沙漠目标（如敦煌戈壁）、南北极冰川目标（Dome C和Greenland）、深对流云DCC（Deep Convective Cloud）及月球目标是目前国内外遥感卫星传感器在轨替代定标方法中应用最为广泛的稳定目标。图1提供了用于辐射定标研究的各种稳定目标的示意图像，如沙漠稳定目标，洋面耀斑，DCC，月球等，作为辐射参考被用于卫星仪器的辐射定标。单独基于这些稳定目标的重复观测可以监测遥感仪器的衰减情况。如果基于该目标通过辐射传输模式RTM、大气顶辐射参考模型、辐射参考仪器的交叉，则可以对遥感仪器进行绝对辐射定标。考虑到不同的辐射基准，其辐射动态范围不一样，如月球的反射率一般为10%，因此使用单一的辐射基准源进行定标，难以覆盖遥感仪器的辐射动态范围；此外，不同辐射基准源适用的波段也有所差别，如DCC由于具有较高的反射率，在较窄动态范围的海色波段容易饱和。反射太阳波段的辐射基准源类型及其特点如表1所示。本文主要综述建立高稳定度的自然目标辐射基准源，为多平台不同时期的光学遥感仪器提供一致的辐射参考，解决跨平台仪器之间长序列辐射观测数据不一致的问题。

2.1 沙漠稳定目标

沙漠场地的辐射稳定性在可见—近红外谱段约为2%，在短波红外谱段约为2%—3%（Helder等，2010；Teillet等，2007）。利用稳定目标进行绝对辐射定标时，卫星过境时刻遥感仪器观测方向的目标方向反射率是关键参数之一。但对于国产历史遥感卫星的光学载荷，不同时期观测的稳定目标地表反射率数据的缺乏，是对其进行历史再定标工作的主要难点。王玲等（2022）基于长时间序列的MODIS BRDF模型参数产品，采用统计分析的方法，建立了全球典型沙漠稳定目标的逐月方向反射率参考模型。根据目标的空间均匀性、时间稳定性、反射率大小以及地域代表性等方面，挑选出了26个国内外沙漠稳定目标。其中国内的沙漠目标选取了13个，均匀地分布在新疆塔克拉玛干沙漠、甘肃的戈壁、内蒙古沙漠和柴达木盆地，每个地区约3—4个目标（Hu等，

2020)。国外的沙漠目标也选取了13个，主要分布在非洲、中东、北美和澳大利亚沙漠戈壁地区。研究结果显示，国外沙漠目标反射率高于国内沙漠稳定目标，如在645 nm处，国内目标Ross-Li模型

的 f_{iso} 参数为0.22—0.38，国外沙漠目标为0.38—0.53。因此在稳定目标辐射定标应用中，联合使用国内外沙漠稳定目标，有助于增大遥感仪器辐射定标的动态范围。

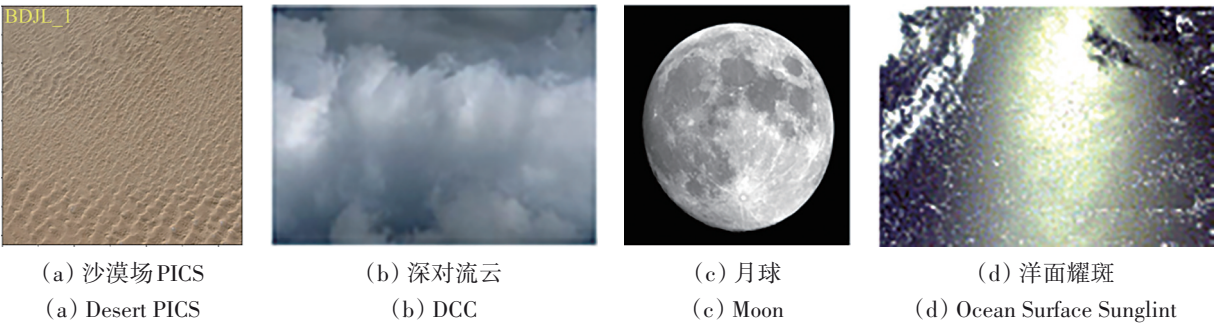


图1 典型稳定目标图
Fig. 1 Typical stable target

表1 反射太阳波段辐射基准源类型及其特点	
Table 1 Types and characteristics of radiation reference sources in the reflected solar bands	
辐射基准源类型	特点
地球目标	沙漠
	√ 反射率中等,30%—40%
	√ 主要集中在中低纬地区,卫星观测具有一定的季节性波动
	冰川
	√ 高反射率,>80%
地外目标	DCC
	√ 适用于波长<900 nm的波段
	√ 高反射率(>80%)、高稳定性,水汽吸收通道也可使用
基准仪器	海洋瑞利散射区
	√ 反射率低,~10%
	√ 区域选择较严格,干洁的深海海洋区域
星上定标源	月球
	√ 反射率低,<10%
太阳+漫反射板,灯源	√ 高稳定性
	√ 动态范围广
MODIS, VIIRS	√ 需要进行时间、空间、光谱进行匹配,依赖于基准仪器的精度,对于基准仪器未匹配到的光谱通道,不能使用
	√ 动态单一
存在辐射衰减的问题	

基于上述13个国内西北地区的沙漠场地辐射基准模型，结合大气参数，利用辐射传输模式，对高分一号宽幅成像仪WFV和FY-3D/MERSI-Ⅱ自发射至今的观测数据进行了重新定标研究（图2）。重新定标后，两者的反射率时间序列波动性（CV）均减小。尤其波段4，WFV由14%降低到4%。波

段4的反射率差异减小，由相差-14%，降低到-2%，光谱订正后差异进一步降到-0.4%（图3）。
为了验证上文建立的沙漠稳定目标的方向反射率参考模型，2019年—2021年连续三年，在敦煌辐射校正场、青海省大柴旦附近的小柴达木湖，十道班和腾格里沙漠附近的乌海、阿拉善等地进行了多次基于无人机平台的地表BRDF观测试验，并基于Ross-Li核驱动模型推算了场地BRDF模型参数（图4）。同时，实验获取的西北地区沙漠场地BRDF与MODIS的陆表BRDF产品（MCD43C1）及反射率产品（MOD/MYD09）进行了对比验证。验证结果表明，基于无人机观测平台获取的沙漠目标地表BRDF参数与MODIS遥感产品有良好的一致性，各波段的相对偏差在5%以内（陶炳成等，2021；何玉青等，2023）。
何兴伟等（2022）基于中国西北地区的10个沙漠场获取的地表反射率光谱观测试验数据，参考Miesch（2003）提出的反正切模型，构建了沙漠地表反射率光谱四参数模型，简化了沙漠场景辐射基准场的光谱表征。结果显示，大部分场地的光谱曲线均表现出相似的光谱特征：光谱反射率在450 nm以下较低，在550—600 nm迅速增加，在800 nm以上趋于平稳，不同场地光谱曲线的区别主要为550 nm附近曲线斜率以及在450 nm和800 nm附近反射率值不同。小柴旦湖西场地的光谱模型和实测光谱计算的大气顶层反射率差异在1%以内，其他场地在3%以内。

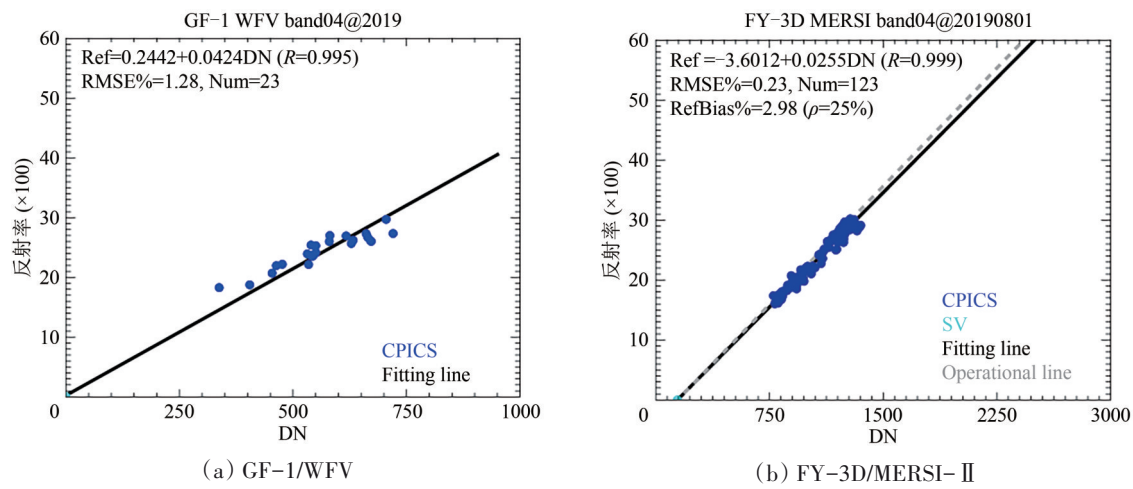


图2 基于国内沙漠基准场地的GF-1/WFV与MERSI- II辐射定标散点结果图

Fig. 2 Scatter plot of WFV and MERSI- II radiometric calibration based on domestic desert reference site

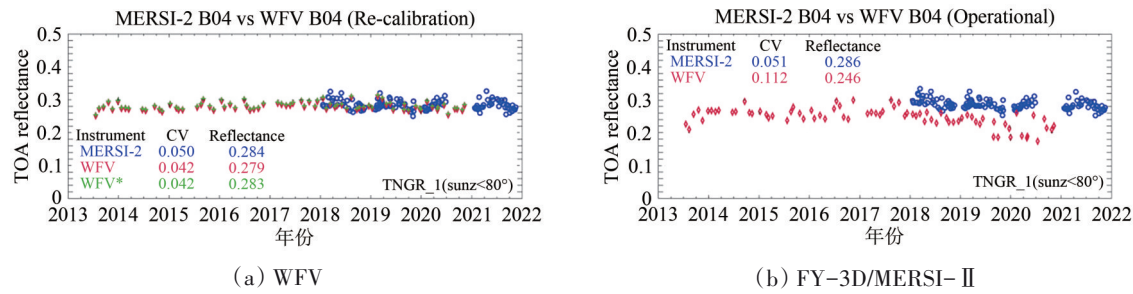


图3 基于国内沙漠基准场地的GF-1 WFV与FY-3D/MERSI- II辐射定标散点结果图

Fig. 3 Time series of WFV and MERSI- II top of atmosphere reflectance before and after re-calibration

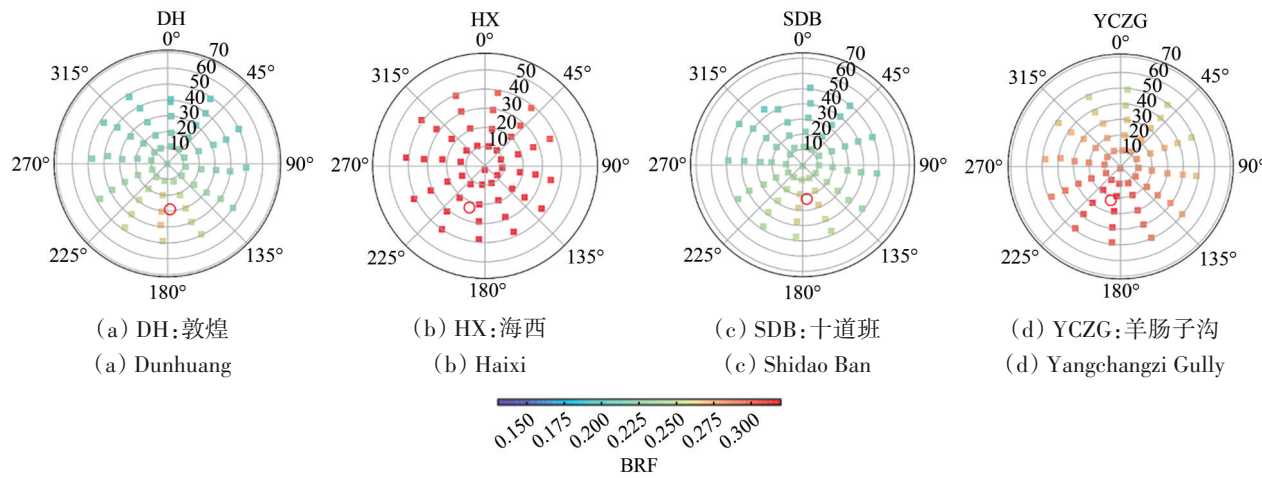


图4 4个观测场地的方向反射比因子观测结果在空间上的分布

Fig. 4 Site directional reflectance factor measurements at four different sites

2.2 永久冰川目标

与沙漠目标相比，冰川目标具有更好的空间一致性和时间稳定性，Cao等（2010）对 Dome C 的长期辐射稳定性研究表明，极地冰川目标可见光波段的反射率年际变化在2%以内，10年的变化

可达1.5%以内，可以满足不同仪器间定标跟踪要求。而且极地冰川具有较高的光谱反射率，在近紫外—可见波段（300—700 nm）范围内，反射率在97%以上（Masonis和Warren，2001），而沙漠目标基本在0.3—0.5（Hu等，2010）。另外，极地

冰川具有海拔高(海平面3 km以上)、大气影响小等优点(Wu等, 2009)。Smith等(2002)的研究表明, 冰雪目标的表观反射率与太阳天顶角之间的关系可以用二次多项式表示。王玲等(2018)基于2002年—2010年期间Aqua MODIS L1B数据, 结合Smith等(2002)提出的冰雪目标反射率与太阳天顶角之间的关系, 建立了南极Dome C、北极

Greenland和中国青藏高原地区昆仑峰永久冰川目标的大气顶反射率辐射基准模型, 如图5所示。3个冰雪目标的大气顶辐射模型的数学形式也显示在图中, 利用这一参数化公式, 结合太阳天顶角, 可以计算出, 在近星下点观测条件下卫星观测的大气顶表观反射率。

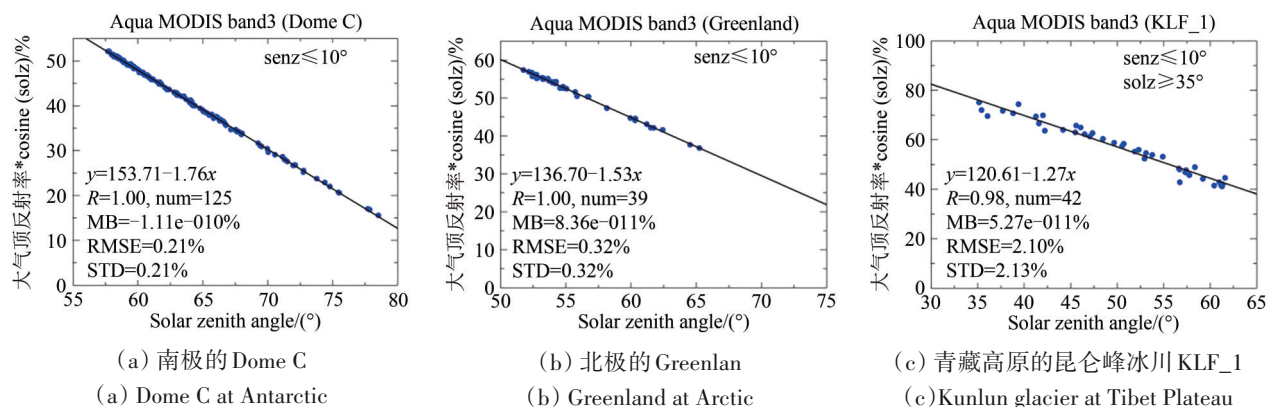


图5 基于2002年—2010年期间Aqua MODIS L1B数据获取的永久冰川目标上空近星下点观测条件下大气顶反射率与太阳天顶角散点图

Fig. 5 Scatter plot of atmospheric top reflectance and solar zenith from permanent glacier targets during 2002—2010

2.3 深对流云DCC目标

与传统的沙漠和冰川目标相比, DCC是热带辐合带最明亮的目标, 具有更稳定的反射率以及接近朗伯体(Lambertian)各向同性的反射特征。当使用大集合统计方法研究反射特性时, DCC被认为是不变的地球目标。同时, DCC位于对流层顶部, 其反射率受水汽和气溶胶吸收的影响非常小。基于DCC目标的定标方法目前已被全球天基卫星交叉定标系统(WMO/GSICS)列为可见光至短波红外波段替代定标方案之一。

Hu等(2004)最早根据红外通道亮温阈值与光学厚度识别DCC目标, 通过跟踪DCC月度反照率的变化评估MODIS等仪器的辐射性能稳定性。Doelling等(2013)基于具有高定标精度的Aqua/MODIS传感器数据的长时间序列跟踪结果表明, DCC反射率在0.65 μm 通道每十年的变化率在0.2%以内, 证明了DCC是稳定的反射目标。Bhatt等(2017)利用DCC与沙漠目标评估MODIS在轨辐射响应随扫描角度变化RVS(Response Versus Scan-angle)的性能变化, 验证了DCC定标方法的可靠性。随后, Bhatt等(2017)基于定标稳定的

MODIS传感器数据, 重新建立了针对短波红外通道的DCC月度BRDF模型, 有效提高了DCC反射率时间序列的稳定性。Wang等(2022)基于DCC目标评估了Suomi/NPP和NOAA-20/VIRS的10年长期校准稳定性和通道间的一致性, 对气候研究提供了数据支撑。周为伟等(2023)基于Himawari-8成像仪观测几何角度数据将DCC反射率归类为不同区间, 利用区间平均反射率来表征BRDF特征实现建模, 在短波红外通道具有较好的各向异性校正效果。

基于DCC目标的辐射定标方法可用于大部分遥感卫星光学传感器。图6展示了FY-3D/MERSI-II数据统计的2022年4月DCC全球地理位置分布频次图。通过跟踪DCC统计值长时间序列变化趋势监测评估传感器辐射响应性能, 目前国内采用DCC作为光学遥感器在轨定标跟踪最多的是风云气象卫星(Chen等, 2013; 张北等, 2023)。

2.4 月球目标历史辐射基准

月球是地球轨道遥感器观测除太阳外视张角最大的天体目标, 反射率范围与地球上的陆表裸地场景接近, 且反射率特性长期保持稳定(10^{-8})

(Stone 和 Kieffer, 2004)。作为一个众所周知的稳定目标，月球提供了独立于地球稳定目标的地外辐射参考，适合作为对地观测卫星在轨定标以及历史数据再定标的基准源 (Jing 等, 2023)。当使

用月球进行辐射定标和仪器稳定性监测时，需要一个复杂模型来描述相位角、非均匀反照率、距离和天平动引起的月球亮度变化，以此匹配不同传感器在不同观测几何条件进行的月球观测。

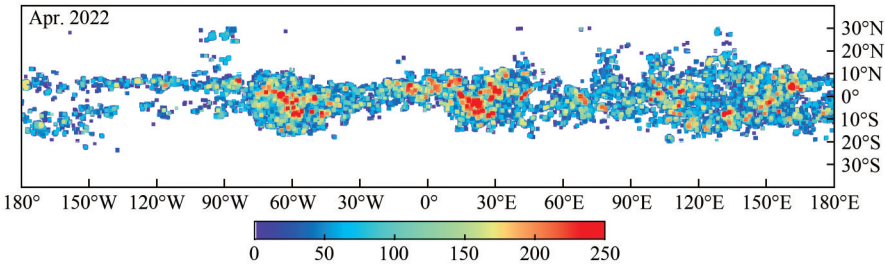


图 6 DCC 全球地理位置分布频次图(2022 年 4 月 FY-3DMERSI- II 数据)

Fig. 6 Geographic Location Distribution Map of global DCC (FY-3DMERSI- II data in April 2022)

近二十年，国内外陆续开展了覆盖不同平台的月球辐射测量，包括地面、高空以及地球和月球轨道航天器，不少学者利用这些观测成功推导出反射太阳波段的月球辐射模型 (Jing 等, 2023)，图 7 综合展示了国内外各种月球模型发展和月球观测试验。例如，在地基月球观测方面，美国地质调查局开发的 ROLO 模型，综合多种数据来源的 MT2009 模型，ESA 利用 CE318-TP9 光度计的高海拔观测改进得到的 LIME 模型。其中，ROLO 模型进一步由全球空基交叉定标系统成员合作开发，衍生出 GIRO (GSICS implementation of the ROLO) 模型，作为通用的月球辐射参考。在航天器观测方面，EUMETSAT 基于对地观测仪器 ENVISAT/SCIAMACHY 领导开发了 LESSR 模型；嫦娥一号的 IIM 仪器，印度月船一号 (Chandrayaan-1) 上的

M3 仪器，以及日本的月球探测器 SELENE/SP 的光度研究加深了对月球辐射特性的认识。其中，由 SP 数据推导的模型能模拟任意观测条件的月球辐亮度图像。随着日益苛刻的定标精度要求。目前，正在进行更多的高精度观测以改进月球模型，例如：中国自 2015 年开始在丽江开展长期地基月球辐射观测试验和数据建模试验 (Wang 等, 2017, 2020)，NASA 和 NIST 领导的多机构合作的空基月球光谱辐照度 (air-LUSI) 项目，致力于在可见近红外光谱区域获取低不确定度 ($<0.5\%$, $k=1$) 的高光谱月球辐照度，NASA 赞助的天基小卫星 ARCSTONE 任务计划在轨通过太阳交叉定标技术以类似的精度获取宽范围月相角的月表反射率数据 (Swanson 等, 2020)。

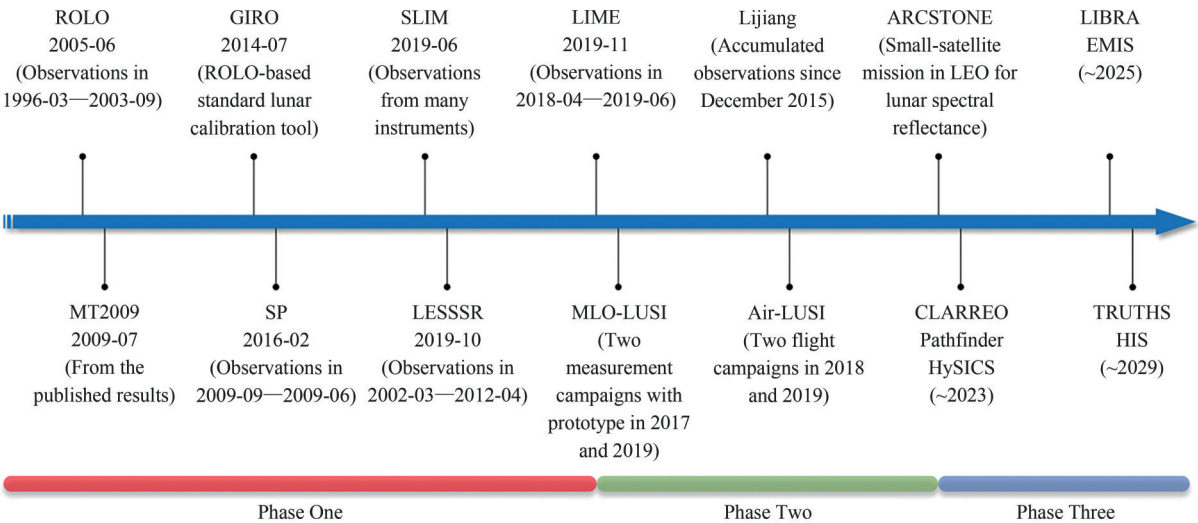


图 7 国内外月球辐照度模型和月球观测活动以及任务概念的简要概括

Fig. 7 Brief summary of lunar irradiance models and lunar observation campaigns along with mission concepts over global research

绝大多数地球轨道卫星都可以在轨获取月球图像,通常有两种模式:例如,低地球轨道卫星仪器可以通过姿态机动实现周期性的月球观测。业务卫星不会频繁的施加大角度机动甚至常规机动,但月球可能会出现在设置有冷空观测窗口的卫星数据中(如:MODIS、MERSI和VIIRS),这些事件可以通过空间关系事先预测。对于地球静止轨道卫星仪器,月球有时会与地球圆盘一起出现在仪器视场中(如:AGRI、ABI)。被动测量情况下,获取的月球图像数量可能难以满足关键的在轨定标需求,需要安排更多的时间和资源以便收集到特定月相角范围的观测,以尽量减少模型在不同观测几何条件模拟的不确定度。同时考虑替代定标方法作为补充和相互比较。

基于月球辐射模型的月球定标方法通过月球光谱辐照度实现,使用较多的GIRO和MT2009模型绝对精度受到限制,最典型的应用是分析仪器响应的时间稳定性。陈林等(2018)利用FY-2E/VISSR的对月观测数据,结合ROLO月球辐照度模型,得到了仪器辐射响应的衰减情况,可见光通道总衰减率约为9.2%,与深对流云(DCC)目标替代定标方法得到的8.1%的衰减十分接近。吴荣华等(2016)通过双通道月球辐射的比值方法(LBR)来回避观测几何和月相角的影响,以稳定的通道3为比对参考,将比值辐照度随时间的线性变化得出其它通道的衰减率,分析了FY-3C/MERSI基于月球观测的相对定标。月球因为没有大气影响,可以作为交叉定标的传递基准。Zhang等(2019a)提出以月球为中间参考的交叉定标,将参考卫星观测到的月球反射率与实验室Apollo月球样本反射率混合,形成高光谱反射率作为待定标卫星的参考光谱,然后通过扩展的双差法实现观测几何校正。Eplee等(2011)使用月球观测对SeaWiFS和MODIS进行交叉定标,得到MODIS仪器之间的一致性为1%—3%,SeaWiFS和MODIS之间的交叉定标一致性为3%—8%。此外,吴荣华等(2019)针对FY-3D/MERSI-II总结了单探元多帧图像和多探元单帧图像月球数据提取及过采样因子计算方法,分析得出多元单帧图像计算的辐照度稳定性优于单探元观测结果。进一步地,针对该仪器探索了基于月球观测的绝对辐射定标方法,将ROLO模型值作为绝对参考计算定标系数(Wu等,2020)。

2.5 辐射参考仪器

基于国际上公认高精度参考仪器,采用国产卫星历史轨道和参考卫星同时过星下点观测(SNO)和近重叠观测(SNO_x),实现国产卫星与参考仪器的历史数据辐射基准传递。目前国际上常用的高精度参考仪器如MODIS、IASI、AIRS以及CrIS(Xiong和Barnes,2006b;Loveless等,2023)。MODIS光谱覆盖0.4—12 μm,空间分辨率为250 m,500 m和1 km。在可见光和近红外波段处的辐射定标精度约2%,短波红外约为3%,热红外波段的亮温精度优于±0.2 K(Chang和Xiong,2011)。CrIS的光谱覆盖650—2550 cm⁻¹,星下点空间分辨率约为14 km。CrIS在长波处的辐射测量不确定度优于0.3 K($k=3$),中波和短波处的辐射观测不确定度优于0.2 K($k=3$)。AIRS的光谱范围为649—2702 cm⁻¹,星下点空间分辨率约为13.5 km。当亮温>260 K时,大部分通道的观测不确定度优于0.25 K($k=1$),亮温为210—260 K时,观测不确定度优于1 K($k=1$)。IASI的光谱覆盖645—2760 cm⁻¹,光谱采样间隔0.25 cm⁻¹,星下点空间分辨率约为12 km,测量不确定度优于0.1 K($k=1$)(Pagano等,2020)。

为实现多遥感器长时间序列辐射数据的一致性定标,在单一遥感器数据再定标的基础上,通过重叠期观测或者稳定目标辐射传递等进行不同平台遥感器观测数据的一致性校正时,还需考虑不同遥感器光谱响应差异的影响,以及轨道漂移所造成的观测时间与观测几何差异的影响。

基于2020年1—4月6个红外通道的AGRI与IASI和CrIS交叉匹配的数据,采用双差方法评估了IASI和CrIS仪器的不确定度,结果如图8和表2所示。评估结果显示,IASI和CrIS仪器在6个热红外波段处的亮温偏差均小于0.2 K,说明CrIS和IASI具有较高的辐射定标精度。

3 光学遥感仪器再定标方法模型

基于上述建立的稳定目标和卫星观测这些目标的数据,就可以开展典型遥感仪器长周期辐射响应趋势的低频特征分析,采用地球稳定目标、月球观测、星上定标源长序列数据分析,推演遥感仪器在轨辐射响应的长序列衰减规律,并拟合求解日衰变率,构建遥感仪器的衰减模型,推算模型关键参数,它将作为遥感仪器全生命周期历史数据再

定标模型。另外，最新发展的计算智能挖掘技术也能用于仪器相对定标和载荷响应衰减估计算，实现长序列卫星历史资料的自动再定标。再者，构建

遥感器完整生命周期内在轨遥测工程数据长期趋势分析模型，建立仪器在轨长期性能跟踪将帮助遥感仪器波动和衰变机理复合分析。

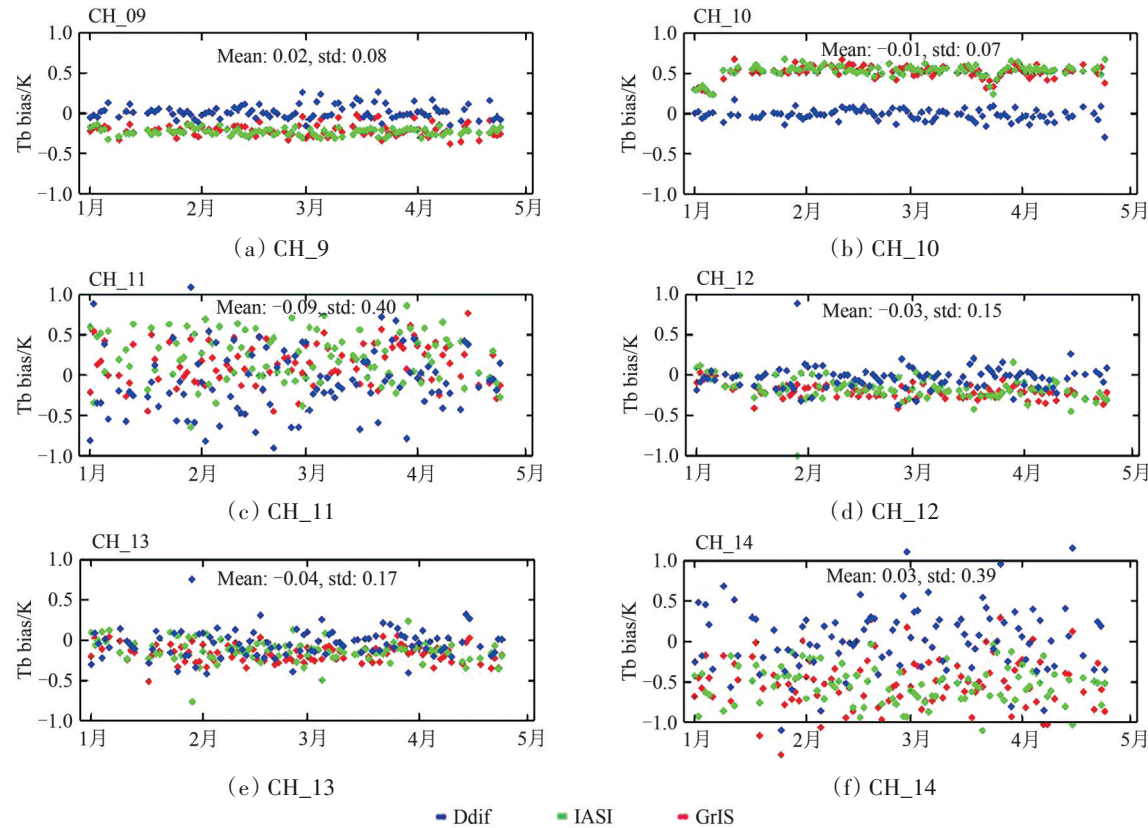


图8 AGRI等6个热红外波段亮温偏差分布结果图
Fig. 8 Results of bright temperature deviation distribution in six thermal infrared bands of AGRI

表2 基准仪器热红外波段亮温偏差测试结果

Table 2 Bright temperature deviation test results of the thermal infrared band of the reference instrument

波段(中心波长)	Mean_bias/K	Std_bias
9 (6.25 μm)	0.019	0.085
10 (7.1 μm)	-0.014	0.068
11 (8.5 μm)	-0.086	0.40
12 (10.7 μm)	-0.030	0.15
13 (12.0 μm)	-0.036	0.17
14 (13.5 μm)	0.027	0.39

3.1 基于稳定目标的光学遥感仪器长序列衰变模型

由于发射过程影响和空间运行期间传感器退化影响，实际遥感仪器的定标系数很难保持恒定。为了监测传感器辐射响应变化，许多卫星传感器都配备了星上定标器，如内置的光源、太阳漫射板(SD)和黑体。对于没有星上定标器的传感器，通常基于卫星针对稳定目标观测数据对遥感仪器退化进行监测并订正。

稳定目标通常具备的特征包括：(1) 高光谱反射率(可见近红外波段在30%以上)，以增加信噪比，降低大气程辐射的影响；(2) 空间均一：大范围平坦的表面，少量或无植被覆盖；(3) 时间稳定：目标特征，如反射率、双向反射率分布函数BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)，随时间基本不变；(4) 近似朗伯体，以减少由于太阳入射能量和卫星观测几何变化导致的卫星接收信号的改变；(5) 反射率光谱平坦，这对于多个传感器进行交叉定标时比较重要(Bannari等，2005；De Vries等，2007；Chander等，2010)。位于非洲、沙特以及我国敦煌、小柴旦湖西和腾格里等沙漠目标，以及极地和青藏冰川目标、深对流云以及月球目标被广泛用于监视遥感仪器辐射响应稳定性。利用稳定目标进行遥感仪器辐射响应稳定性跟踪监测的原理是基于稳定目标具有较高辐射稳定性的特点，在假设大气稳定和晴空

情况下,对目标的BRDF效应(月球目标为月相、天平动和月—地距离)进行订正后,如果遥感仪器在稳定目标上空的辐射观测是平稳的,表明仪器的辐射响应没有发生退化;否则,认为遥感仪器的辐射响应存在退化现象。光学器件在太空环境中的辐射退化通常呈指数衰减的模式(Heidinger等,2003)。

对风云三号卫星的MERSI或VIRR反射通道的辐射退化规律的研究结果表明,波长小于500 nm的蓝光波段衰减较大,如MERSI的波段1,8,9,10,VIRR的波段7和8(Chen等,2013;王玲等,2018;Wang等,2018)。波长越短衰减越大,如MERSI的波段8(412 nm),VIRR的波段7(455 nm)。FY-3A MERSI的波段8和FY-3A VIRR波段7的年衰减率接近10%。波长大于600 nm的红光和近红外波段最为稳定,对于MERSI年衰减率可在0.5%以内;波长在500—600 nm的绿光波段,衰减率介于蓝光和红光之间。此外仪器的辐射效应衰减呈现在轨初期的衰变最大,在轨运行一年之后衰变速度趋缓的变化特点。

3.2 反射太阳波段综合定标模型

针对光学遥感仪器历史数据再定标的需求,本研究建立的基于辐射衰减估计的历史再定标模型,该模型包括辐射衰减估计和在轨初期绝对定标系数估计两个部分。即根据遥感仪器在辐射基准源上空的长时间观测数据,对遥感仪器的辐射衰减进行估计,获得定标系数修正量的时间序列;然后结合在轨初期的绝对定标系数获得其他时刻的辐射定标系数。

为了针对每个通道建立最佳的再定标模型,在辐射衰减估计以及绝对定标系数估计时,融合使用了多个辐射基准源,即针对不同的光谱通道,选用了不同的辐射基准源组合方案。由于不同类型的辐射基准源样本数据的量纲不同,如月球目标是辐照度,基准仪器是反射率,无法进行直接匹配和融合,所以首先需要对它们进行量纲的统一。为解决不同样本融合问题,首先将所有辐射基准源样本数据进行了归一化处理(图9)。然后,将量纲转换为与归一化的DN值相同,以获得具有相同量纲的样本数据。在轨初期的绝对定标系数估计采用了徐娜等(2015)提出的综合定标方法。

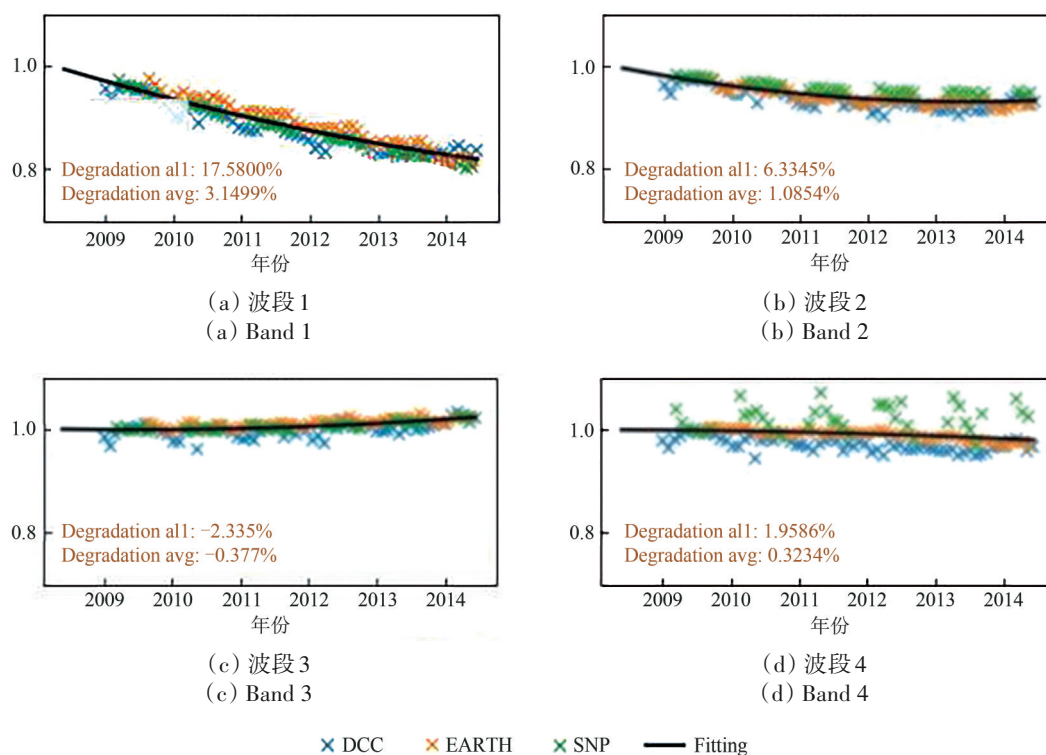


图9 FY-3A MERSI-I 太阳反射波段衰减跟踪函数;蓝色为DCC样本数据,红色为多场地样本数据,绿色为交叉定标样本数据,黑色为衰减跟踪函数;degradation all为全时间序列的总衰减率,degradation avg为平均的年衰减率

Fig. 9 FY-3A MERSI-I Solar reflection band attenuation tracking function; blue is DCC sample data, red is multi-site sample data, green is cross-calibration sample data, black is attenuation tracking function; degradation all is the total decay rate of full time series, and degradation avg is the average annual decay rate

3.3 基于人工智能的光学遥感仪器长序列衰变模型

随着机器学习和人工智能的发展，一些基于统计和回归的数学方法也逐渐的开始应用于卫星数据处理和分析中。对多通道卫星数据进行长序列的衰变跟踪或相对定标，则要综合各个通道的信息，在多时相数据的变化场景中识别出伪不变目标。迭代加权多元变化检测变换（IR-MAD）技术采用统计学原理，寻求一种变换以综合卫星各个通道信息，从而自动检测出两个不同时间相间卫星观测场景中的不变特征。实践表明该方法非常有效，精度与手动选取伪不变特征方法相当（王俊伟等，2019）。

王俊伟等（2019）利用 IR-MAD 方法对北非地区超过 5 年的 FY-3A/MERSI 时间序列数据进行了分析，获得了不同时期及不同时间间隔的传感器相对增益的测量值的序列数据集。图 10 展示了利用 IR-MAD 方法获得的 FY-3A/MERSI 各通道随时间的衰变曲线，由于其通道数量较多，这里只展示了部分具有不同衰减量通道。可以看到，尽管不同通道具有不同的衰减特性，IR-MAD 方法依然可以准确地评估其趋势。通过与其它替代定标的方法进行比较，利用 IR-MAD 方法获得的仪器衰变具有很好的一致性，其大部分通道结果的偏差在 1%—2% 左右，通道 8 为短波蓝色通道，偏差为 4%—5%，其偏差主要是受大气影响的制约。整个过程非常的简单、快速而且是完全自动的，足以媲美通过手动获得时不变特征，进而相对定标得到的结果。

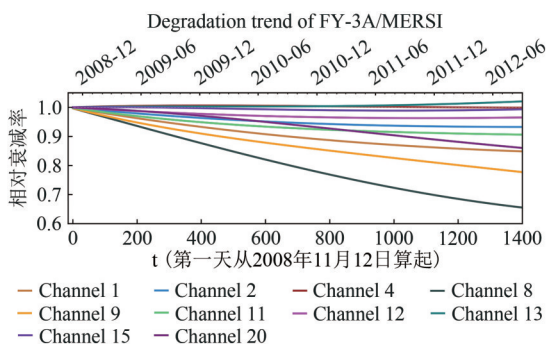


图 10 利用 IR-MAD 方法获得 FY-3A/MERSI 典型通道响应衰减曲线

Fig. 10 Degradation trends of FY-3A/MERSI channels by IR-MAD method

随着深度学习的发展，卷积神经网络也逐渐被利用于遥感的各个领域。同样，深度学习也被利用在遥感图像的变化检测中，这往往需要对场景中的变化区域进行标记用以训练网络。对于基于伪不变目标的定标任务来说，往往需要确定由不同时间获得的图像场景中不变的点，即伪不变点。通过卫星传感器对伪不变目标不同时间的观测，以进行相对辐射定标。通过对长序列的数据进行分析，即可对仪器的长期衰变进行跟踪和定标。

Li 等（2022）通过在 FY-3A&3B&3C/VIRR 上的实验，验证了基于深度学习方法的有效性，与多场地定标方法的结果具有很好的一致性。对于三颗卫星上的 VIRR 大部分通道来说，IR-MAD 的定标结果和多场地定标的结果偏差均小于 2%，个别通道最大为 4%。

3.4 热红外波段再定标模型

红外遥感器的辐射响应一般跟仪器环境温度和状态高度相关，跟踪分析遥感器在轨运行的遥测参数和状态参数的长期变化，提取长期的星上状态数据（黑体温度、仪器温度和辐冷温度）和遥感器扫描黑体及冷空间数据，剔除一些偶然的数据波动，保持状态数据的连续性，揭示仪器在轨运行状态的变化规律，建立遥感器在轨运行状态参数跟踪分析与辐射响应模型，针对传统的定标算法依靠冷空和星上黑体进行两点定标所带来的对非线性、杂散光等不能很好的处理的问题，要消除上述问题必须发展基于仪器背景辐射（徐寒列等，2023）和杂散光影响的物理算法（朱吉彪等，2021），还有仪器光谱响应的测不准和在轨变化也是导致定标精度下降另一个难题。这里以风云三号上两个典型红外仪器的再定标模型改进技术做一个综述。

3.4.1 IRAS 再定标精细化模型

红外分光计（IRAS）是风云三号上最典型的红外大气探测仪器，基于发射前数据建立了 IRAS 精细化再定标处理模型，并在此基础上结合仪器发射前和在轨的状态，将光谱响应函数偏移、非线性以及自发射辐射等额外辐射对定标精度的影响进行综合考虑，针对在轨样本数据发展了在轨再定标算法，利用交叉定标的手段完成模型精度

评估。将精细化再定标模型应用于长序列历史观测的定标算法改进, 针对 FY-3C/IRAS 2014 年—2020 年长时间序列数据进行再定标处理, 结果表明, 该模型可使长时间序列数据集定标精度由 1 K—1.5 K 提升至优于 0.5 K, 各通道数据偏差特征也得到改进, 偏差与目标亮温的强相关性减弱, 且在长时间序列结果中表现稳定, 偏差随季节波动现象得到有效改善。具体过程如下:

首先从 IRAS 观测不同目标源接收到的辐射来源出发建立符合物理原理的定标方程, 溯源该过程中可能存在的引入定标误差的项, 并据此构建精细化再定标方案, 分别以发射前和在轨数据进行建模拟合, 得到模型参数。结合自发射订正处理的辐射定标的基本方程, 发现影响背景辐射的几个主要辐射源为基板发射辐射、黑体反射望远镜主镜和次镜的发射辐射以及一些量级较小的散射辐射。模型中最重要的参数是自发射辐射项, 主要来自仪器的光学元件, 由于探测器保持在一个固定的温度下, 这一项的变化决定了随着仪器温度的变化而产生的增益的变化。

将自发射辐射与仪器基板辐射相关联, 仪器自发射辐射是在基础发射之外的额外辐射, 因此为了更好地拟合其变化规律可引入一个参考辐射作为自发射辐射的基准。假设自发射项与基板的相对辐射变化值之间存在二次函数的关系, 可把自发射辐射表示成如下形式:

$$R_{\text{self}} = b_1(R_{\text{BP}} - R_{\text{BP}_{\text{mode}}}) + b_2(R_{\text{BP}} - R_{\text{BP}_{\text{mode}}})^2 \quad (1)$$

式中, b_1 和 b_2 为待拟合的参数, R_{BP} 代表仪器在观测状态下某一时刻的基板辐射值, $R_{\text{BP}_{\text{mode}}}$ 代表仪器平均状态的基板辐射值, 作为自发射的参考辐射。其中, R_{BP} 和 $R_{\text{BP}_{\text{mode}}}$ 可以通过对应的基板观测温度计算得到。利用不同工况温度下的多组数据完成精细化定标模型参数的拟合, 由于各通道的自发射辐射等情况差异较大, 需要逐通道分别拟合计算。

图 11 为部分通道的精细化定标与传统定标结果对比, 由图可见传统定标结果偏差较大, 通道 1 达到了 -2.5 K, 使用精细化定标模型后, 内黑体等效温度与物理温度的偏差均在 0.3 K 以内。再定标模型不仅使亮温偏差有了明显的减小, 偏差随目标亮温变化的趋势也趋于平缓, 说明自发射模型应用于发射前试验数据有良好的改进效果。

3.5.2 VIRR 热红外波段再定标模型

风云三号极轨气象卫星所搭载的可见光红外扫描辐射计 (FY-3/VIRR) 是继承了风云一号多通道扫描辐射计 (MVISR), 风云三号的 A、B、C 星均搭载了该仪器, 三颗星共提供了自 2008 年以来 10 余年的对地观测数据, 可实现长时间序列的地球物理参数定量反演, VIRR 历史数据可广泛应用于气候研究和气候服务的各个方面。FY-3/VIRR 红外通道采用的是星上黑体—冷空两点法定标, 早期的 AVHRR、MODIS 以及后来的 VIIRS、MERSI、高分辨率对地观测红外相机等国内外光学成像类仪器的红外通道均采用该定标方法 (Walton 等, 1998; Xiong 等, 2006; 赵艳华 等, 2021)。然而由于早期的认知水平和仪器制造工艺的限制, 业务定标过程可能会存在一些考虑不全之处, 使得 L1 辐射级业务存档数据存在明显的系统性偏差及偏差的时空变化特征。

徐寒列等 (2023) 以国际公认的辐射定标精度较高的红外高光谱探测器 Metop-B/IASI 为参考仪器, 利用 SNO 匹配数据对 FY-3C/VIRR 热红外通道偏差特征进行长时间序列跟踪, 发现业务定标偏差存在 3 个明显特征: 偏差的非线性特征、偏差的昼夜差异性以及季节变化特征。FY-3C/VIRR 红外通道的定标偏差来源主要有两个, 一是业务的定标模型采用线性定标加非线性能量修正的方式, 该定标模型中当黑体温度发生变化时, 本质上改变了二次项系数, 由此会引入定标偏差; 二是星上黑体辐射计算中对黑体发射率不为 1 所产生的反射环境辐射部分的考虑不周所引起的差异, 从而出现偏差的非线性特征以及偏差的昼夜差异和季节变化特征。

针对 FY-3C/VIRR 热红外通道的偏差现象重构了再定标模型。该模型基于二次拟合的定标方案, 采用 VIRR 和参考载荷 IASI 的 SNO 匹配数据, 确定了定标模型的常数项和二次项系数; 并使用 IASI 的参考辐射和二次定标模型, 对定标时刻星上黑体的路径辐射进行了模型构建, 以星上黑体的物理温度作为环境辐射的代理数据, 分析黑体温度偏差与黑体物理温度的关系, 进而构建星上黑体路径辐射模型, 并基于 SNO 匹配数据确定模型参数。

徐寒列等 (2023) 以 Metop-B/IASI 为参考仪器, 评估了 VIRR 热红外通道 2018 年业务定标和再

定标的偏差结果。评估结果显示，业务定标结果偏差的昼夜差异较大，白天的定标偏差明显大于夜间，昼夜偏差差异在冬季普遍达到了0.35 K以上，冬季昼夜差异较大，2018年的1月、11月和12月的SNO匹配样本中，白天和夜间的业务定标偏差之差分别达到-0.38 K、-0.412 K和-0.436 K；对数据进行再定标修正后，冬季3个月的偏差的昼夜差异分别为-0.038 K、-0.047 K和-0.099 K，昼夜差异均小

于0.1 K，说明再定标模型对冬季昼夜偏差的差异改进效果非常明显。在偏差的季节变化方面，2018年逐月的白天匹配样本统计结果中，偏差最大月份与偏差最小月份分别是12月和6月，之间差异达到0.665 K；修正后的结果中，全年偏差最大月份与偏差最小月份的差异在0.2 K左右，说明随着该模型对偏差昼夜差异的改进，偏差的季节变化尤其是白天数据的偏差季节变化也得到了明显的改进。

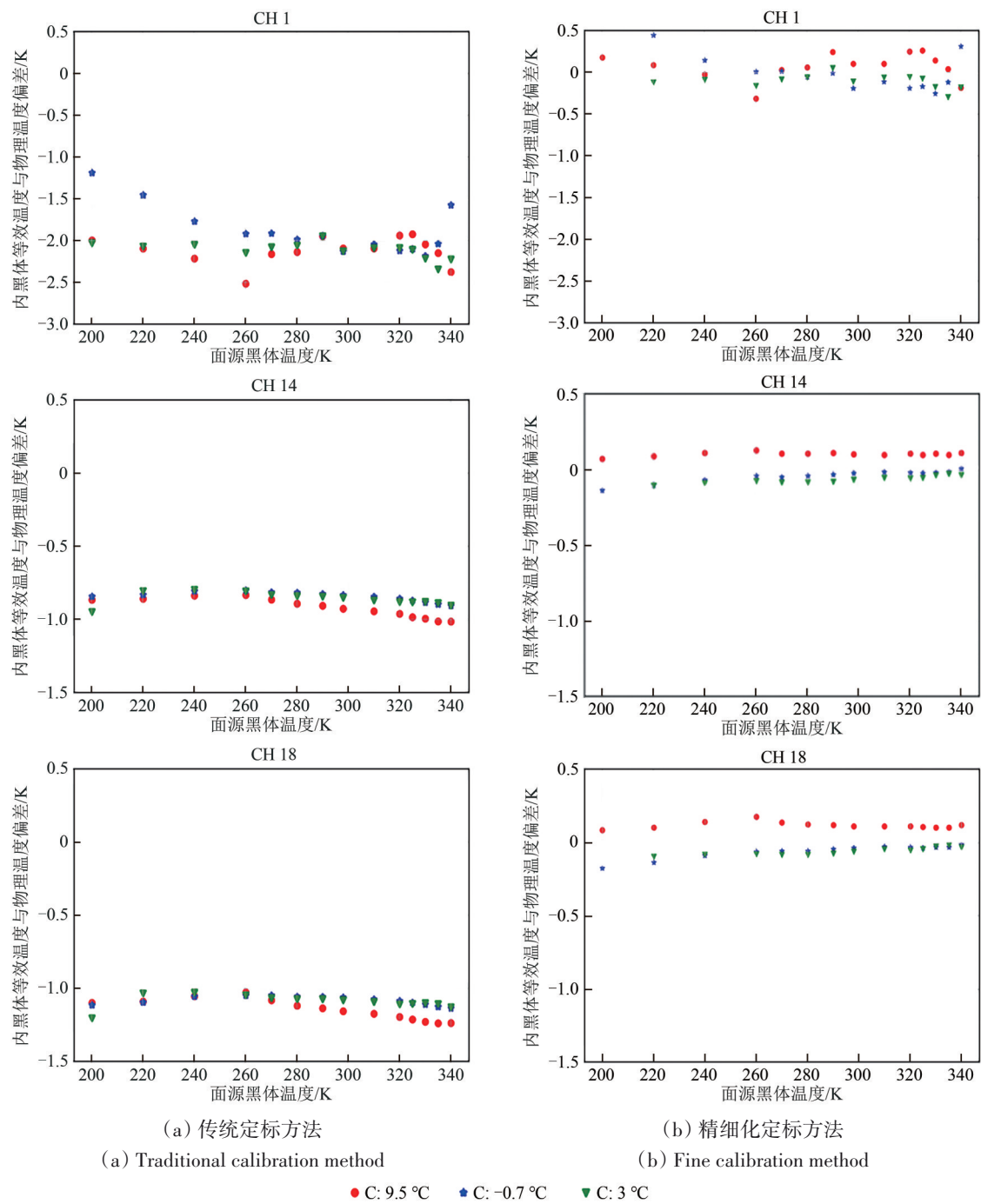


图 11 发射前不同工况温度下精细化定标与传统定标结果内黑体等效亮温和物理温度偏差
Fig. 11 Blackbody equivalent light and physical temperature deviation of fine calibration at different operating temperatures before launch

4 光学遥感仪器辐射响应机理复合分析

光学遥感仪器在轨工作除了自身元件及系统的性能退化,还会受到一序列复杂因素如杂散光、串光、偏振、温度等的影响,从而产生性能衰变和数据质量下降。光学载荷仪器外部结构、内部组件和卫星轨道特征均在不同程度上产生辐射偏振、电子信号串光以及杂光污染,从而造成目标辐射测量值与真实值之间的差异,最终产生定标误差。基于遥感仪器的光机电架构,开展仪器内

部光学系统、探测器件和电子学信号采集的辐射传递链路仿真分析,以此分别获得偏振、串光、杂光的产生机理及其对定标模型的影响,再综合各项因素,构建多因子关联定标订正模型,研究的技术思路如图12所示。通过实验室仿真测试,结合历史仪器关键定标参数复测,对多个因素及综合模型的模拟仿真结果进行对比分析,以验证与完善定标影响模型。对光学遥感仪器衰变产生的原因和误差影响机理进行分析,有助于制定适当的补偿措施、优化设备维护和改进监测方法,以提高遥感数据的质量和可靠性。

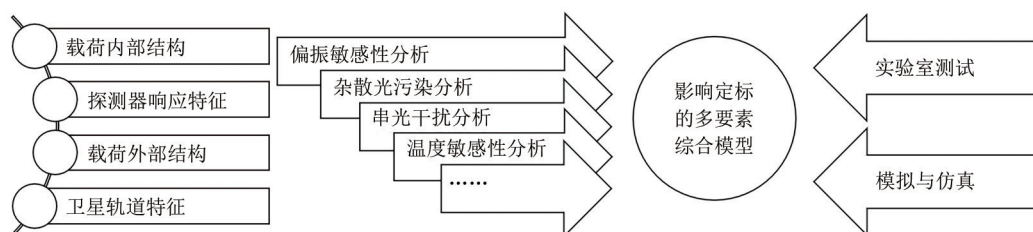


图12 影响定标的多要素精细分析模型和技术思路

Fig. 12 Detailed analysis of impact factors on the calibration accuracy and technique road map

4.1 杂散光仿真及订正

搭载在卫星上的光学载荷在空间环境中工作时极易受到外部辐射源产生的杂散光的干扰。研究表明, FY-3 卫星的可见红外辐射计 (VIRR) 在高纬度地区昼夜交替时, 对地面成像时受到外部太阳杂散光辐射的影响 (徐寒列等, 2015; 朱吉彪等, 2021)。场外辐射进入光学系统会在焦平面上增加一个空间变化的信号, 污染对地场景图像, 从而干扰系统的探测能力, 影响卫星产品数据的准确性。因此, 对杂散光进行定量估计和消除是分析仪器信号异常和提高图像质量的关键技术之一。

在分析太阳辐射杂散光产生机理的基础上, 提出了结合卫星轨道位置的仿真分析方法, 以探究太阳杂散光对载荷成像质量的影响 (Zhao 等, 2021)。首先根据 FY-3C 轨道参数对卫星进行在轨运行仿真, 根据太阳、地球和卫星的位置关系, 得到太阳矢量与载荷之间的角度变化规律。基于载荷机械结构和光学散射模型, 通过光学仿真软件进行光线追迹以研究杂散光在主镜的空间分布情况, 处理流程如图13所示。

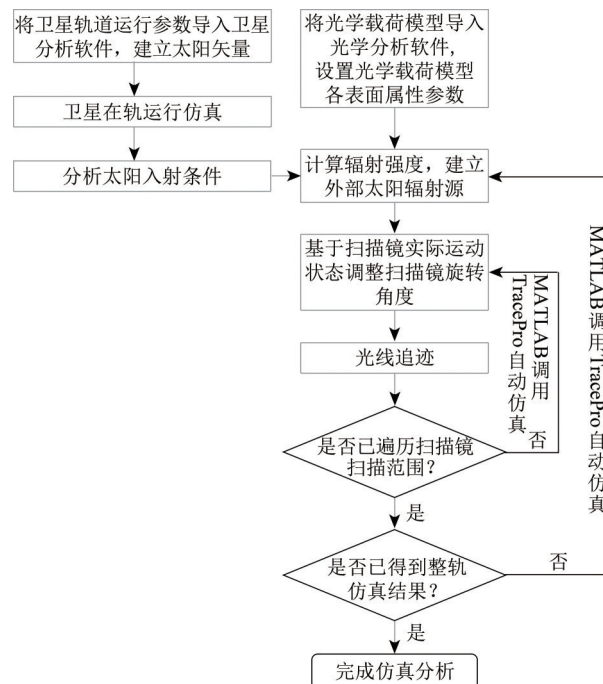


图13 卫星光学载荷外部太阳杂散光仿真流程图

Fig. 13 Simulation flow diagram of external solar stray light for satellite optical payload

通过模拟获得的 VIRR 杂散光发生时间和强度结果, 将其与真实地球观测实际数据进行对比,

两者具有较高的一致性，如图 14 所示。结果表明，提出的方法是研究轨道上载荷外部杂散光规律的正确有效的途径，能够定量得到不同时刻的杂散

光强度及分布。该方法具有一定的普适性，可以输入不同载荷的轨道参数以及光机模型，推广至其他载荷进行定量分析。

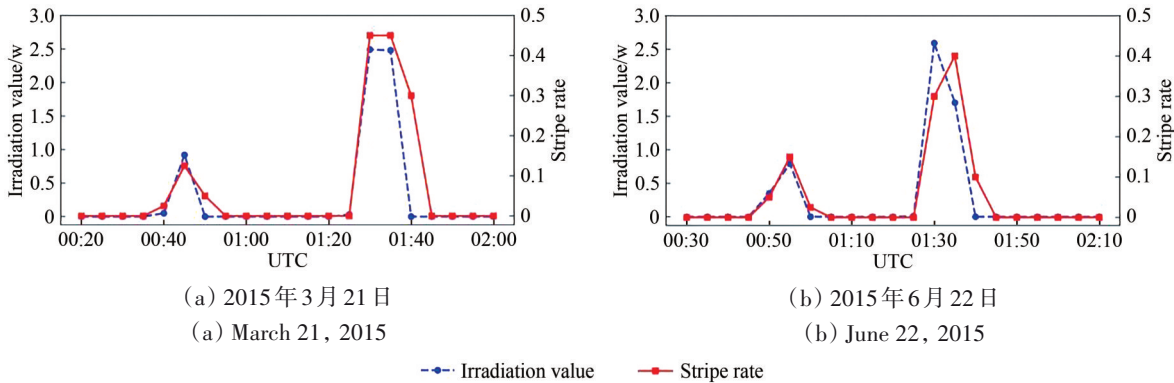


图 14 2015 年 2 天 VIRR 单轨对地观测图像条纹率与太阳杂散光在主镜上总辐射通量值比较
Fig. 14 Comparison of the stripe rate of the VIRR monorail ground observation image in 2015 with the total radiation flux value of the solar stray light in the main mirror

FY-3C VIRR 在高纬度昼夜交替区域附近由于地平线附近太阳光照射，导致仪器扫描镜和其他部件产生杂散光，使得对地观测图像被污染，尤其 VIRR 中红外第 3 通道 ($3.7\text{ }\mu\text{m}$) 图像产生了严重条带噪声，影响了后续产品的质量精度和数据应用。

引起图像污染的杂散光条带噪声可视为结构噪声，呈现出明显的方向特性，即图像在水平方

向和垂直方向梯度具有明显差异。根据图像条带噪声各向异性的特点，利用单向变分条带去除模型，设计了基于高斯—赛德尔迭代法的条带去除模型递推求解公式（朱吉彪 等，2021）。以 VIRR 第 3 通道对地观测真实影像数据为例，对图像进行条带噪声去除研究。其杂散光订正结果如图 15 所示。

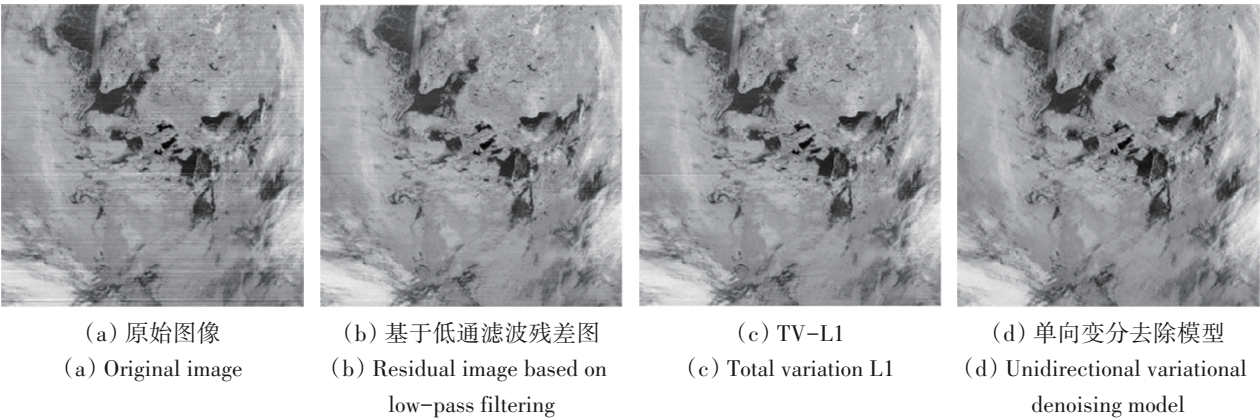


图 15 杂散光订正模型结果对比
Fig. 15 Comparison of the results of the stray-light correction model

采用噪声去除前后图像的行均值曲线与定量评价指标——辐射质量改进因子 IF (Improvement Factors of Radiometric Quality) 等进行杂散光去除效果评价。结果表明，单向变分模型对 FY-3C VIRR 第 3 通道观测数据太阳污染条带噪声具有较好的订正效果，实验中，峰值信噪比 PSNR (Peak

Signal-to-Noise Ratio) 提升到 32.77 dB；在真实数据实验中，IF 提升到 16.99 dB。

4.2 仪器响应串光

通道间信号串扰是存在于多光谱光学遥感器的普遍现象，会对焦平面通道的观测图像产生显

著的条纹影响 (Wilson 等, 2017)。由于以暗太空为背景的月球具有点光源成像的特性, 可以利用月球观测数据并结合图像校正方法, 对 FY-3D 的核心载荷: 中分辨率成像光谱仪 (MERSI-II) 的中长波红外通道的信号串扰效应进行在轨检测分析并进行订正。

肖达等 (2020) 主要对 MERSI-II 通道间串扰进行了分析。首先分析各通道所受信号串扰规律, 以方便后续进行订正。在中长波红外波段 (20—23 通道) 明显的串扰现象强度在 0%—5% 不等, 造成了观测数据的污染。存在串扰现象时, 对于单探元月球图像, 月球旁边会出现较小的亮斑, 它随着探元信号的增加而下降, 并且每个选定探元接收到的串扰污染信号, 都来自与它中心对称位置的探元。例如通道 20 的探元 1, 其图像内的串扰污染信号与通道 21 的探元 10 的月球响应位置基本重合。因此可以得出规律: 串扰污染的主要贡献来自同一焦平面内中心对称探元, 可把它称作“中心对称现象”。

对 FY-3D MERSI-II 的自适应串扰订正算法通过冷空月球图像筛选和分析, 根据不同时期的月球图像特征, 计算特定通道的串扰信号分布和串扰系数, 并将串扰系数应用于月球图像, 以去除串扰污染对成像质量的影响。算法核心为串扰系数的计算, 首先需要将每个探元的污染信号与参考信号进行比较。月球周围的冷空可以近似地看作是理想的真实值, 对于污染刚好出现在主月球响应之外的像素来说, 将其作为参考信号十分合适。将真实信号和参考信号之间的差值作为每个探元的污染值, 然后使用最小二乘法拟合, 得到串扰系数。订正时需要每个串扰发射通道单独处理。首先根据焦平面各通道的排布位置, 选定某个受污染通道的探元 i 进行分析, 计算不同探测器的串扰系数; 其次, 将串扰系数应用到该发射通道所有像素, 得到该通道在所有像素点产生的串扰污染信号后, 将该发射通道的串扰污染信号从接收通道中扣除; 对每一个发射通道进行订正, 直到所有串扰信号被订正完毕。按照以上步骤对焦平面内的每一个探元进行操作, 即可得到串扰订正后的月球响应。

4.3 偏振效应

对于非偏振卫星载荷, 偏振是一种干扰信息,

辐射传递链路的偏振灵敏度会影响遥感观测数据的精度及其后续应用, 需要对仪器的偏振灵敏度进行仿真分析, 实现定量去除以提高辐射定标精度。以 FY-3D MERSI-II 遥感观测数据为例, 对非偏载荷的偏振灵敏度进行分析, 并以此为基础仿真出仪器在不同入射角度等参数下的偏振辐射响应查找表, 以方便修正定标模型。首先, 针对在轨后的 MERSI-II, 选择洋面场景这一偏振度较大的区域, 如海洋耀斑区域, 首先对卫星观测数据和环境数据如气溶胶光学厚度和风速风向进行预处理。其次, 基于 Cox&Munk 海洋表面三维波浪斜坡的概率密度模型和菲涅耳反射定律来共同描述海表辐射偏振状态。然后, 利用 6SV 辐射传输模型分析大气对偏振辐射状态的影响, 将其与海表辐射状态耦合得到大气顶偏振辐射状态, 实现了 MERSI-II 偏振辐射特性的评估与校正 (何玉青等, 2022)。

通过模拟对应的洋面场景的反射率和偏振度等辐射量, 与 POLDER 偏振探测器实际获取的偏振数据进行对比验证分析, 两者具有较高的反射率和偏振度相关性 (张一鹏等, 2020)。实验分析了 MERSI-II 在 412 nm 通道的偏振辐射特性, 发现其偏振度随着卫星天顶角的变化呈现不对称分布, 反射率误差随着卫星天顶角及偏振度的变化基本比较稳定。图 16 给出了 MERSI 对于不同观测几何、风速风向的偏振敏感性变化规律。可以看出, MERSI-II 传感器的偏振灵敏度是非线性响应, 与通道波长、卫星观测角等仪器自身参数等相关, 观测几何尤其是太阳天顶角和卫星天顶角对大气顶的偏振辐射量值的影响较大; 风速风向的影响较为微弱。综合考虑这些因素在不同条件下对 TOA 偏振辐射影响的差异, 仪器的偏振灵敏度应该是根据这些规律设计成查找表的形式以进行后续的偏振效应订正。

4.4 辐射响应的温度依赖

精细化定标模型还必须考虑环境因素影响。一般研究者认为太阳反射波段的辐射响应系数与仪器温度关系弱, 因此, 国内遥感器发射前测试通常并没有包括严格的温度响应测试。但事实上, 由于反射波段探测器不控温, 其工作环境在轨会发生变化 (如 SeaWiFS 的焦平面温度年内的变化约为 4° , FY-3A MERSI 自 2008 年—2013 年变化约

为 10 度), 遥感器的在轨响应也随之变化 (如 SeaWiFS 的温度响应校正量约 1%), 这种变化对于高精度定量应用, 特别是气候变化研究来说是不可忽视的。因此必须针对性的研究仪器温度响应

特性在轨分析算法, 基于不同温度下的稳定目标数据进行在轨估算及订正 (孙凌 等, 2019; 张北 等, 2023; 周为伟 等, 2023)。

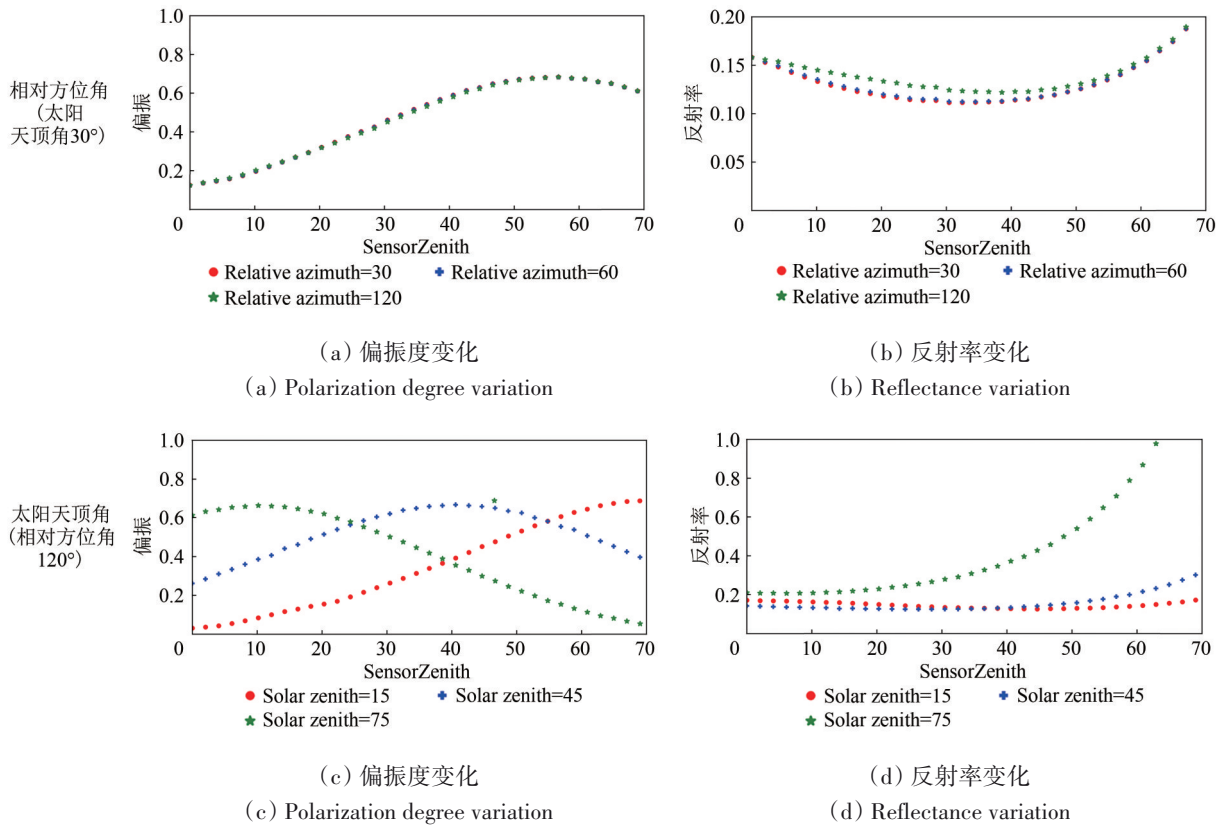


图 16 不同相对方位角和太阳天顶角下反射率和偏振度随着卫星天顶角的变化(气溶胶光学厚度为 0.15, 风速为 15 m/s, 风向角为 150°)

Fig. 16 The reflectivity and polarization under different relative azimuth and solar zenith angles change with the satellite zenith Angle (Aerosol optical thickness is 0.15, wind speed is 15 m/s, wind direction angle is 150°)

通过精准提取地球稳定目标数据, 获得不同温度下的理想目标观测数据, 开展遥感器部件温度数据的相关性分析, 开展目标观测、目标与理论模式差异与部件温度的相关特征分析, 确定特征温度参数, 如焦平面温度。根据遥感器的在轨状态变化, 确定合理的在轨参考温度, 拟合建立温度响应模型, 获得温度校正因子; 通过时间序列定标精度和稳定度分析, 开展温度校正效果验证。

研究分析发现 FY-3D/MERSI- II 观测 DCC 反射率时间序列 (图 17 (a)) 除了存在长期衰减趋势外, 有非常明显的年际波动, 这个波动与仪器温

度有非常好的同步特征。借鉴 MODIS 和 SeaWiFS 的温度校正形式, 假定 FY-3D/MERSI- II 观测 DCC 反射率值与温度关系式为式 (2)。

$$\rho_{\text{normal}} = \rho_{T_0} (1 + \Delta T \cdot K) \quad (2)$$

式中, ρ_{normal} 表示观测的深对流云反射率值, ρ_{T_0} 表示参考温度下反射率值, ΔT 表示参考温度与观测温度的差值, K 就是要求的温度校正因子。为了回避仪器自身衰减对校正因子的影响, 选择仪器后期衰减较小时段的数据 (2021 年) 进行拟合, 参考温度和参考温度下的反射率均选择 2021 年第一天数据。图 17 (b) 显示了通道 6 反射率与探测器温度的校正因子拟合结果。

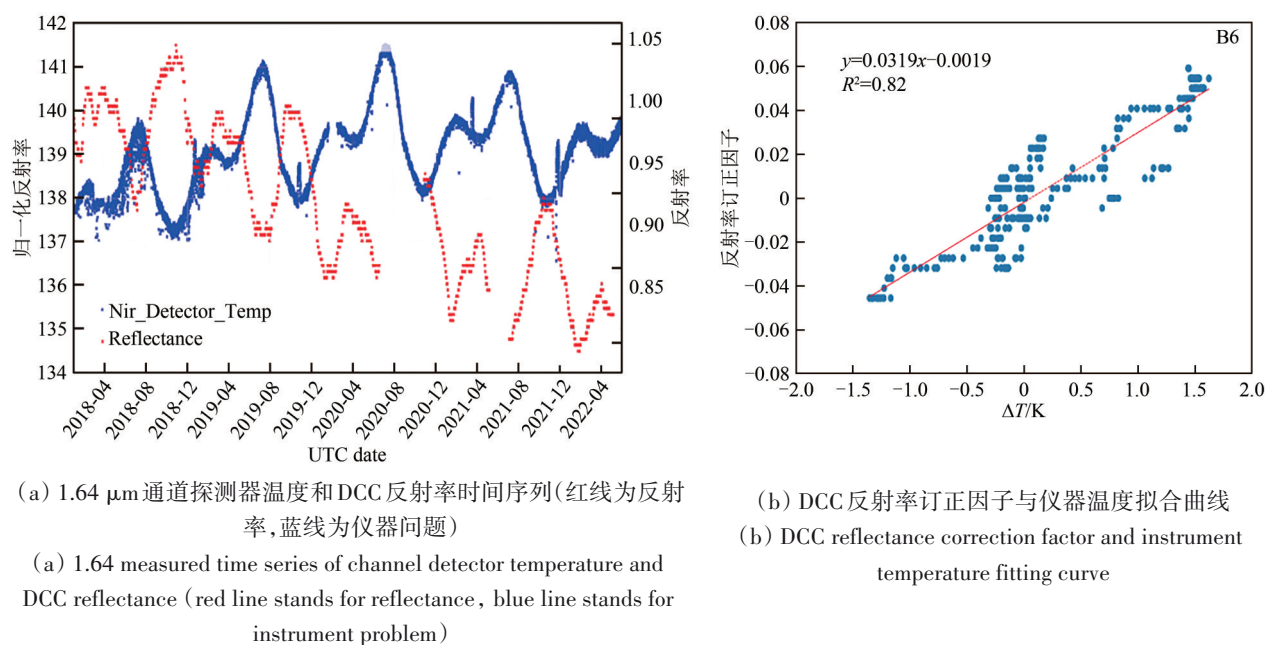


图 17 FY-3D/MERSI- II 通道 6 ($1.64 \mu\text{m}$) 深对流云目标反射率与探测器温度关系曲线(周为伟等, 2023)

Fig. 17 FY-3D/MERSI- II channel 6 ($1.64 \mu\text{m}$) Relationship between reflectance of deep convective cloud target and instrument detector temperature

5 结 语

本文针对国产遥感卫星的长时间序列历史数据再定标共性技术, 综述了光学遥感仪器再定标时的辐射基准、再定标模型及定标的影响机理等 3 个方面最新研究进展。基于多类地球稳定目标及地外天体月球等统一辐射基准, 寻找单一遥感器生命周期内的辐射定标衰变规律, 建立不同时期观测数据统一辐射定标修正算法。论文还综述了多卫星平台、多遥感器的统一辐射定标方法, 包括场地基准统一溯源、交叉定标、辐射衰减订正、轨道漂移订正、大数据分析等技术手段, 实现多遥感器辐射观测的归一化, 为建立定标精度统一、数据质量一致的长时间序列基础遥感数据集提供技术支撑。这为卫星气候数据集生产和质量评估提供处理技术理论基础, 促进量化遥感的长期气候变化应用研究。

文中系统综述了针对沙漠、冰雪、DCC、月球目标, 基于长期卫星观测和地面试验建立这些稳定目标的辐射基准模型, 分析了各种稳定目标辐射基准的方向特性、光谱特征以及时空变化规律。文中针对太阳反射通道仪器辐射响应衰减和红外通道辐射溯源链中影响定标精度的因素, 提出了光学遥感仪器的辐射再定标精细处理模型。

并基于风云卫星光学仪器的再定标工程实践, 从遥感仪器定标精度的影响因素机理出发, 如杂光串光污染、偏振和温度依赖等, 深刻剖析了各影响因素的大小与光学遥感仪器辐射响应衰变之间的关系, 并建立了仪器响应短周期波动订正的再定标处理模型, 包括非线性订正、串光订正、偏振效应订正等, 这为中国历史遥感数据再定标提供了系统性解决思路, 为进一步提高遥感数据长期定标质量和可靠性奠定了方法基础。

当前气候变化研究和超高精度定量遥感对遥感卫星定标精度与长期稳定性提出了极高的要求, 通常反射太阳波段的辐射精度期望为 1% ($k=1$), 热红外波段的辐射测量精度期望为 0.1 K ($k=3$), 并且确保多种遥感仪器观测数据的有效衔接和相互可比较。本文综述的辐射基准和再定标模型受目标特性、大气环境、辐射衰减等因素的影响, 其辐射精度依然有限, 难以突破气候应用期望的精度水平。因此建立可追溯至国际单位制 (SI) 的空间辐射测量是当前和未来国内外重要的研究方向, 如欧洲和美国相继提出了 TRUTHS (Fox 等, 2003) 和 CLARREO (Wielicki 等, 2013) 计划, 以及我国正在逐步开展空间辐射测量基准计划, 即中国空基辐射基准 (Chinese Space-based Radiometric Benchmark, CSRB) (Zhang 等, 2020; 卢乃锰等,

2020)。这将为提高各类卫星遥感数据的定标精度和深度定标应用提供更可靠的基准基础,并将在环境监测、气候变化研究等领域发挥重要作用。

志 谢 本论文的撰写得到多位辐射定标领域科学家和朋友的指导和协助,感谢审稿人给与宝贵修改意见,武汉大学的孙开敏教授和东北师范大学的孙仲秋教授给论文修改提供非常宝贵建议,景振华、王俊伟和张北分别在月球定标、人工智能定标和DCC定标方面的综述提供了丰富素材,在此一并表示感谢。

参考文献(References)

- Arai K. 2001. A reflectance based vicarious calibration with on-site instruments monitoring. *Advances in Space Research*, 28(1): 11-20 [DOI: 10.1016/S0273-1177(01)00265-4]
- Bannari A, Omari K, Teillet P M and Fedosejevs G. 2005. Potential of Getis statistics to characterize the radiometric uniformity and stability of test sites used for the calibration of Earth observation sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(12): 2918-2926 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.857913]
- Bhatt R, Doelling D, Scarino B, Haney C and Gopalan A. 2017. Development of seasonal BRDF models to extend the use of deep convective clouds as invariant targets for satellite SWIR-band calibration. *Remote Sensing*, 9(10): 1061 [DOI: 10.3390/rs9101061]
- Bojinski S, Verstraete M, Peterson T C, Richter C, Simmons A and Zemp M. 2014. The concept of essential climate variables in support of climate research, applications, and policy. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(9): 1431-1443 [DOI: 10.1175/BAMS-D-13-00047.1]
- Brest C L and Rossow W B. 1992. Radiometric calibration and monitoring of NOAA AVHRR data for ISCCP. *International Journal of Remote Sensing*, 13(2): 235-273 [DOI: 10.1080/01431169208904037]
- Cao C Y, Ma L L, Upreti S, Li C R and Tang L L. 2010. Spectral characterization of the Dunhuang calibration/validation site using hyperspectral measurements//*Proceedings Volume 7862, Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization*. Incheon: SPIE: 137-146 [DOI: 10.1117/12.869606]
- Chander G, Xiong X, Choi T and Angal A. 2010. Monitoring on-orbit calibration stability of the Terra MODIS and Landsat 7 ETM+ sensors using pseudo-invariant test sites. *Remote Sensing of Environment*, 114(4): 925-939 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.12.003]
- Chang, T. Xiong, X. 2011. Assessment of MODIS Thermal Emissive Band On-orbit Calibration. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 49(6), 2415-2425.10.1109/TGRS.2010.2098881.
- Chen L, Hu X Q, Xu N and Zhang P. 2013. The application of deep convective clouds in the calibration and response monitoring of the reflective solar bands of FY-3A/MERSI (Medium Resolution Spectral Imager). *Remote Sensing*, 5(12): 6958-6975 [DOI: 10.3390/rs5126958]
- Chen L, Zhang P, Wu R H, Hu X Q and Zhang L. 2018. Monitoring radiometric response change of visible band for FY-2 geostationary meteorological satellite by lunar target. *Journal of Remote Sensing*, 22(2): 211-219 (陈林, 张鹏, 吴荣华, 胡秀清, 张璐. 2018. 月球目标监测风云二号静止气象卫星可见光辐射响应变化. *遥感学报*, 22(2): 211-219) [DOI: 10.11834/jrs.20186464]
- De Vries C, Danaher T, Denham R, Scarth P and Phinn S. 2007. An operational radiometric calibration procedure for the Landsat sensors based on pseudo-invariant target sites. *Remote Sensing of Environment*, 107(3): 414-429 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.09.019]
- Doelling D R, Morstad D, Scarino B R, Bhatt R and Gopalan A. 2013. The characterization of deep convective clouds as an invariant calibration target and as a visible calibration technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1147-1159 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2225066]
- Eplee RE, Sun JQ, Meister G, et al., 2011. Cross calibration of SeaWiFS and MODIS using on-orbit observations of the Moon. *Appl Opt*, Jan 10; 50(2): 120-33. doi: 10.1364/AO.50.000120. PMID: 21221136.
- Fox N, Aiken J, Barnett J J, Briottet X, Carvell R, Frohlich C, Groom S B, Hagolle O, Haigh J D, Kieffer H H, Lean J, Pollock D B, Quinn T, Sandford M C W, Schaepman M, Shine K P, Schmutz W K, Teillet P M, Thome K J, Verstraete M M and Zalewski E. 2003. Traceable radiometry underpinning terrestrial- and Helio-studies (TRUTHS). *Advances in Space Research*, 32(11): 2253-2261 [DOI: 10.1016/S0273-1177(03)90551-5]
- Fraser G T and Datla R V. 2006. Achieving satellite instrument calibration for climate change (ASIC3)//*Proceedings of the National Conference Center*. NIST
- Goldberg M, Ohring G, Butler J, Cao C, Datla R, Doelling D, Gärtner V, Hewison T, Iacovazzi B, Kim D, Kurino T, Lafeuille J, Minnis P, Renaut D, Schmetz J, Tobin D, Wang L, Weng F, Wu X, Yu F, Zhang P and Zhu T. 2011. The global space-based inter-calibration system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4): 467-475 [DOI: 10.1175/2010BAMS2967.1]
- Gu X F, Tian G L, Yu T, Li X Y, Gao H L and Xie Y. 2013. Principle and Method of Radiometric Calibration for Space Optical Remote Sensor. Beijing: Science Press (顾行发, 田国良, 余涛, 李小英, 高海亮, 谢勇. 2013. 航天光学遥感辐射定标原理与方法. 北京: 科学出版社)
- He X W, Hu X Q, He L L, Wang L, Tao B C, Hu W J and Feng X H. 2022. Surface reflectance spectral characteristic model of desert calibration site network in northwest China. *Acta Optica Sinica*, 42(6): 0628003 (何兴伟, 胡秀清, 何灵莉, 王玲, 陶炳成, 胡文杰, 冯小虎. 2022. 我国西北部沙漠定标场网的地表反射率光谱特征模型. *光学学报*, 42(6): 0628003) [DOI: 10.3788/AOS202242.0628003]
- He Y Q, Hu W J, Hu X Q, Zhu J B, He X W and Jin W Q. 2023. Calibration site BRDF modeling method based on ground and low-altitude UAV joint observation. *Acta Optica Sinica*, 43(15): 1528001 (何玉青, 胡文杰, 胡秀清, 朱吉彪, 何兴伟, 金伟其. 2023. 基于

- 地面与低空无人机联合观测场地 BRDF 建模方法. 光学学报, 43(15): 1528001 [DOI: 10.3788/AOS230941]
- He Y Q, Jiang M D, Hu X Q, Liu M Q, Jin W Q and Hu Q. 2022. Retrieval and analysis of MERSI polarization radiation characteristics based on ocean scene. *Acta Optica Sinica*, 42(6): 0628002 (何玉青, 姜梦蝶, 胡秀清, 刘明奇, 金伟其, 胡奇. 2022. 基于洋面场景的 MERSI 偏振辐射特性反演及其分析方法. 光学学报, 42(6): 0628002) [DOI: 10.3788/AOS202242.0628002]
- Heidinger A K, Foster M J, Walther A and Zhao X P. 2014. The pathfinder atmospheres-extended AVHRR climate dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(6): 909-922 [DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00246.1]
- Heidinger A K, Straka W C III, Molling C C, Sullivan J T and Wu X Q. 2010. Deriving an inter-sensor consistent calibration for the AVHRR solar reflectance data record. *International Journal of Remote Sensing*, 31(24): 6493-6517 [DOI: 10.1080/01431161.2010.496472]
- Heidinger A K, Sullivan J T and Rao C R N. 2003. Calibration of visible and near-infrared channels of the NOAA-12 AVHRR using time series of observations over deserts. *International Journal of Remote Sensing*, 24(18): 3635-3649 [DOI: 10.1080/0143116021000023907]
- Helder D L, Basnet B and Morstad D L. 2010. Optimized identification of worldwide radiometric pseudo-invariant calibration sites. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36(5): 527-539 [DOI: 10.5589/m10-085]
- Hollmann R, Merchant C J, Saunders R, Downy C, Buchwitz M, Cazeau A, Chuvieco E, Defourny P, De Leeuw G, Forsberg R, Holzer-Popp T, Paul F, Sandven S, Sathyendranath S, Van Roozendaal M and Wagner W. 2013. The ESA Climate Change Initiative: satellite data records for essential climate variables. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(10): 1541-1552 [DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00254.1]
- Hu X Q. 2012. Unified Radiometric Recalibration Study on Long-term Historical Data Record of Meteorological Satellite Sensors. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences (胡秀清. 2012. 气象卫星长序列多传感器历史数据统一辐射再定标方法研究. 北京: 中国科学院遥感应用研究所)
- Hu X Q, Liu J J, Sun L, Rong Z G, Li Y, Zhang Y, Zheng Z J, Wu R H, Zhang L J and Gu X F. 2010. Characterization of CRCS Dunhuang test site and vicarious calibration utilization for Fengyun (FY) series sensors. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36(5): 566-582 [DOI: 10.5589/m10-087]
- Hu X Q, Wang L, Wang J W, He L L, Chen L, Xu N, Tao B C, Zhang L, Zhang P and Lu N M. 2020. Preliminary selection and characterization of pseudo-invariant calibration sites in Northwest China. *Remote Sensing*, 12(16): 2517 [DOI: 10.3390/rs12162517]
- Hu Y B, Wielicki B A, Yang P, Stackhouse P W, Lin B and Young D F. 2004. Application of deep convective cloud albedo observation to satellite-based study of the terrestrial atmosphere: monitoring the stability of spaceborne measurements and assessing absorption anomaly. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(11): 2594-2599 [DOI: 10.1109/TGRS.2004.834765]
- Huang S S, Zeng Y, Chen W R and Yi W. 2021. Status and application of China's civil land observation satellites. *Satellite Applications*, (10): 12-16 (黄树松, 曾湧, 陈卫荣, 易维. 2021. 我国民用陆地观测卫星现状及应用. 卫星应用, (10): 12-16)
- Jing Z H, Hu X Q, Wang Y, Wu R H, Chen L, Zhang L, Huang Y, Wang S, Li S and Zhang P. 2023. Activities to promote the moon as an absolute calibration reference. *Remote Sensing*, 15(9): 2431 [DOI: 10.3390/rs15092431]
- Li G R, He Y Q, Hu X Q and Wang J W. 2023. Cross calibration technology for the same platform of FY-3 optical imager based on IR-MAD no-change pixels. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(10): 2337-2349 (李国荣, 何玉青, 胡秀清, 王俊伟. 2023. 基于 IR-MAD 不变像元的风云三号光学成像仪同平台交叉定标. 遥感学报, 27(10): 2337-2349) [DOI: 10.11834/jrs.20221585]
- Li X T, Ye Z Z, Ye Y M and Hu X Q. 2022. A convolutional neural network-based relative radiometric calibration method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 5403611 [DOI: 10.1109/TGRS.2021.3105182]
- Lin M S, He X Q, Jia Y J, Bai Y, Ye X M and Gong F. 2019. Advances in marine satellite remote sensing technology in China. *Acta Oceanologica Sinica*, 41(10): 99-112 (林明森, 何贤强, 贾永君, 白雁, 叶小敏, 龚芳. 2019. 中国海洋卫星遥感技术进展. 海洋学报, 41(10): 99-112) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2019.10.007]
- Loveless M, Knuteson R, Revercomb H, Borg L, DeSlover D, Martin G, Taylor J, Iturbide-Sanchez F and Tobin D. 2023. Comparison of the AIRS, IASI, and CrIS infrared sounders using simultaneous nadir overpasses: novel methods applied to data from 1 October 2019 to 1 October 2020. *Earth and Space Science*, 10(7): e2023EA002878 [DOI: 10.1029/2023EA002878]
- Lu N M, Ding L, Zheng X B, Ye X, Li C R, Lü D R, Zhang P, Hu X Q, Zhou C H, You Z, Fang J C, Gong J Y, Jiang X W, Li J J, Ma L L and Xu N. 2020. Introduction of the radiometric benchmark satellite being developed in China for remote sensing. *Journal of Remote Sensing (Chinese)*, 24(6): 672-680 (卢乃锰, 丁雷, 郑小兵, 叶新, 李传荣, 吕达仁, 张鹏, 胡秀清, 周成虎, 尤政, 房建成, 龚建雅, 蒋兴伟, 李建军, 马灵玲, 徐娜. 2020. 中国空间辐射测量基准技术. 遥感学报, 24(6): 672-680) [DOI: 10.11834/jrs.20200011]
- Ma L L, Wang N, Gao C X, Zhao Y G, Yang B Y, Wang X H, Han Q J, Xu N, Song P L and Liu Y K. 2023. On-orbit absolute radiometric calibration for optical remote sensing satellites: progress and trends. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(5): 1061-1087 (马灵玲, 王宁, 高彩霞, 赵永光, 杨本永, 王新鸿, 韩启金, 徐娜, 宋培兰, 刘耀开. 2023. 光学遥感卫星在轨绝对辐射定标: 进展与趋势. 遥感学报, 27(5): 1061-1087) [DOI: 10.11834/jrs.20222117]
- Masonis S J and Warren S G. 2001. Gain of the AVHRR visible channel as tracked using bidirectional reflectance of Antarctic and Greenland snow. *International Journal of Remote Sensing*, 22(8): 1495-1520 [DOI: 10.1080/01431160121039]
- Miesch C, Cabot F, Briottet X, et al. 2003. Assimilation method to derive spectral ground reflectance of desert sites from satellite datasets[J]. *Remote Sensing of Environment*, 87(2/3): 359-370.
- Molling C C, Heidinger A K, Straka W C III and Wu X Q. 2010. Calibrations for AVHRR channels 1 and 2: review and path towards

- consensus. *International Journal of Remote Sensing*, 31(24): 6519-6540 [DOI: 10.1080/01431161.2010.496473]
- Ohring G, Tansock J, Emery W, Butler J, Flynn L, Weng F Z, St Germain K, Wielicki B, Cao C Y, Goldberg M, Xiong J, Fraser G, Kunkee D, Winker D, Miller L, Ungar S, Tobin D, Anderson J G, Pollock D, Shipley S, Thurgood A, Kopp G, Ardanuy P and Stone T. 2007. Achieving satellite instrument calibration for climate change. *EoS, Transactions American Geophysical Union*, 88(11): 136 [DOI: 10.1029/2007EO110015]
- Pagano T S, Aumann H H, Broberg S E, Cañas C, Manning E M, Overoye K O and Wilson R C. 2020. SI-traceability and measurement uncertainty of the atmospheric infrared sounder version 5 level 1B radiances. *Remote Sensing*, 12(8): 1338 [DOI: 10.3390/rs12081338]
- Platnick S, Meyer K G, King M D, Wind G, Amarasinghe N, Marchant B, Arnold G T, Zhang Z B, Hubanks P A, Holz R E, Yang P, Ridgway W L and Riedi J. 2017. The MODIS cloud optical and microphysical products: collection 6 updates and examples from Terra and Aqua. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(1): 502-525 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2610522]
- Popp T, Hegglin M I, Hollmann R, Arduin F, Bartsch A, Bastos A, Bennett V, Boutin J, Brockmann C, Buchwitz M, Chuvieco E, Ciais P, Dorigo W, Ghent D, Jones R, Lavergne T, Merchant C J, Meysignac B, Paul F, Quegan S, Sathyendranath S, Scanlon T, Schröder M, Simis S G H and Willén U. 2020. Consistency of satellite climate data records for Earth system monitoring. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(11): E1948-E1971 [DOI: 10.1175/BAMS-D-19-0127.1]
- Smith D L, Mutlow C T and Rao C N. 2002. Calibration monitoring of the visible and near-infrared channels of the Along-Track Scanning Radiometer-2 by use of stable terrestrial sites. *Applied Optics*, 41(3): 515-523 [DOI: 10.1364/AO.41.000515]
- Stone T C and Kieffer H H. 2004. Assessment of uncertainty in ROLO lunar irradiance for on-orbit calibration//*Proceedings Volume 5542, Earth Observing Systems IX*. Denver: SPIE: 300-310 [DOI: 10.1117/12.560236]
- Stone T C, Rossow W B, Ferrier J and Hinkelman L M. 2013. Evaluation of ISCCP multisatellite radiance calibration for geostationary imager visible channels using the moon. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1255-1266 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2237520]
- Sun L, Hu X Q and Xu N. 2019. Temperature sensitivity and on-orbit calibration analysis for FY-3B MERSI shortwave infrared bands. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 14(5): 374-384 (孙凌, 胡秀清, 徐娜. 2019. FY-3B MERSI 短波红外波段温度响应与在轨定标分析. *大气与环境光学学报*, 14(5): 374-384) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.05.008]
- Sun L, Qiu H, Wu R H, Wang J, Zhang L Y and Zhang P. 2021. Long-term consistent recalibration of VIRR solar reflectance data record for Fengyun polar-orbiting satellites. *Journal of Meteorological Research*, 35(6): 926-942 [DOI: 10.1007/s13351-021-1049-3]
- Swanson R, Kehoe M, Stebbins M, Courrier H, Lukashin C, Jackson T, Cooney M, Davis W, Kopp G, Smith P, Buleri C, Stone T C. 2020. The ARCSTONE project to calibrate lunar reflectance//*Proceedings of the 2020 IEEE Aerospace Conference*. Big Sky: IEEE: 1-10 [DOI: 10.1109/AERO47225.2020.9172629]
- Tao B C, Hu X Q, Yang L K, Zhang L, Chen L, Xu N, Wang L, Wu R Q, Zhang D F and Zhang P. 2021. BRDF feature observation method and modeling of desert site based on UAV platform. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(9): 1964-1977 (陶炳成, 胡秀清, 杨磊库, 张璐, 陈林, 徐娜, 王玲, 吴瑞强, 张督锋, 张鹏. 2021. 无人机平台的沙漠场地 BRDF 特征观测方法及建模. *遥感学报*, 25(9): 1964-1977) [DOI: 10.11834/jrs.20200084]
- Teillet P M, Barsi J A, Chander G and Thome K J. 2007. Prime candidate Earth targets for the post-launch radiometric calibration of space-based optical imaging instruments//*Proceedings Volume 6677, Earth Observing Systems XII*. San Diego: SPIE: 304-315 [DOI: 10.1117/12.733156]
- Walton C C, Sullivan J T, Rao C R N and Weinreb M P. 1998. Corrections for detector nonlinearities and calibration inconsistencies of the infrared channels of the advanced very high resolution radiometer. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C2): 3323-3337 [DOI: 10.1029/97jc02018]
- Wang J W, Hu X Q, He Y Q and Gao K. 2019. Response degradation analysis of Fengyun-3A medium-resolution spectral imager based on intelligent detection of invariant pixels. *Acta Optica Sinica*, 39(9): 0912001 (王俊伟, 胡秀清, 何玉青, 高昆. 2019. 基于智能检测不变像元的 FY-3A/MERSI 仪器响应衰变分析. *光学学报*, 39(9): 0912001) [DOI: 10.3788/AOS201939.0912001]
- Wang L, Hu X Q, Chen L and He L L. 2018. Consistent calibration of VIRR reflective solar channels onboard FY-3A, FY-3B, and FY-3C using a multisite calibration method. *Remote Sensing*, 10(9): 1336 [DOI: 10.3390/rs10091336]
- Wang L, Hu X Q, Xu N, Chen L, Zhang P and Xu H L. 2023. Research on construction of directional reflectance reference model for desert stable earth targets. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(10): 2270-2282 (王玲, 胡秀清, 徐娜, 陈林, 张鹏, 徐寒列. 2023. 沙漠稳定目标方向反射率参考模型构建研究. *遥感学报*, 27(10): 2270-2282) [DOI: 10.11834/jrs.20221587]
- Wang L, Hu X Q, Zheng Z J and Chen L. 2018. Radiometric calibration tracking detection for FY-3A/MERSI by joint use of snow targets in south and north poles. *Acta Optica Sinica*, 38(2): 0212003 (王玲, 胡秀清, 郑照军, 陈林. 2018. 联合南北极冰雪目标的 FY-3A/MERSI 辐射定标跟踪监测. *光学学报*, 38(2): 0212003) [DOI: 10.3788/AOS201838.0212003]
- Wang W H, Cao C Y, Shao X, Blonski S, Choi T, Upreti S, Zhang B and Bai Y. 2022. Evaluation of 10-year NOAA/NASA Suomi NPP and NOAA-20 VIIRS Reflective Solar Band (RSB) Sensor Data Records (SDR) over deep convective clouds. *Remote Sensing*, 14(15): 3566 [DOI: 10.3390/rs14153566]
- Wang Y, Hu X Q, Chen L, Huang Y, Li Z F, Wang S R, Zhang P, Wu R H, Zhang L and Wang W. 2020. Comparison of the lunar models using the hyper-spectral imager observations in Lijiang, China. *Remote Sensing*, 12(11): 1878 [DOI: 10.3390/rs12111878]
- Wang Y, Huang Y, Wang S R, Li Z F, Zhang Z H, Hu X Q and Zhang

- P. 2017. Ground-based observation system development for the moon hyper-spectral imaging. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 129: 055002
- Wielicki B A, Young D F, Mlynczak M G, Thome K J, Leroy S, Corliss J, Anderson J G, Ao C O, Bantges R, Best F, Bowman K, Brindley H, Butler J J, Collins W, Dykema J A, Doelling D R, Feldman D R, Fox N, Huang X, Holz R, Huang Y, Jin Z, Jennings D, Johnson D G, Jucks K, Kato S, Kirk-Davidoff D B, Knuteson R, Kopp G, Kratz D P, Liu X, Lukashin C, Mannucci A J, Phojanamongkolkij N, Pilewskie P, Ramaswamy V, Revercomb H, Rice J, Roberts Y, Roithmayr C M, Rose F, Sandford S, Shirley E L, Smith W L, Soden B, Speth P W, Sun W, Taylor P C, Tobin D and Xiong X. 2013. Achieving climate change absolute accuracy in orbit. Bulletin of the American Meteorological Society, 94(10): 1519-1539 [DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00149.1]
- Wilson T, Wu A S, Shrestha A, Geng X, Wang Z P, Moeller C, Frey R and Xiong X X. 2017. Development and implementation of an electronic crosstalk correction for bands 27-30 in terra MODIS collection 6. Remote Sensing, 9(6): 569 [DOI: 10.3390/rs9060569]
- Wu A S, Xiong X X and Cao C Y. 2009. Using BRDF derived from MODIS observations over Dome C to characterize calibration stability and consistency of POS sensors//Proceedings Volume 7456, Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization V: Readiness for GEOSS III. San Diego: SPIE: 37-48 [DOI: 10.1117/12.824743]
- Wu R H, Zhang P, Xu N, Hu X Q, Chen L, Zhang L and Yang Z D. 2020. FY-3D MERSI on-orbit radiometric calibration from the lunar view. Sensors, 20(17): 4690 [DOI: 10.3390/s20174690]
- Wu R H, Zhang P, Yang Z D, Hu X Q, Ding L and Chen L. 2016. Monitor radiance calibration of the remote sensing instrument with reflected lunar irradiance. Journal of Remote Sensing, 20(2): 278-289 (吴荣华, 张鹏, 杨忠东, 胡秀清, 丁雷, 陈林. 2016. 基于月球反射的遥感器定标跟踪监测. 遥感学报, 20(2): 278-289) [DOI: 10.11834/jrs.20165155]
- Wu R H, Zhang P, Zheng X B, Hu X Q, Xu N, Zhang L and Qiao Y L. 2019. Data collection and irradiance conversion of lunar observation for MERSI. Optics and Precision Engineering, 27(8): 1819-1827 (吴荣华, 张鹏, 郑小兵, 胡秀清, 徐娜, 张璐, 乔延利. 2019. 星载成像仪月数据提取和辐照度转换方法研究. 光学精密工程, 27(8): 1819-1827) [DOI: 10.3788/OPE.20192708.1819]
- Xian D, Zhang P, Gao L, Sun R J, Zhang H Z and Jia X. 2021. Fengyun meteorological satellite products for earth system science applications. Advances in Atmospheric Sciences, 38(8): 1267-1284 [DOI: 10.1007/s00376-021-0425-3]
- Xiao D, Xu N, Hu X Q, Wu R H, Niu X H, Wang X H and He Y Q. 2020. On-orbit detection and correction of crosstalk effect of FY-3D MERSI-II signals. Acta Optica Sinica, 40(10): 1011001 (肖达, 徐娜, 胡秀清, 吴荣华, 钮新华, 王向华, 何玉青. 2020. FY-3D MERSI-II信号串扰效应在轨检测及订正. 光学学报, 40(10): 1011001) [DOI: 10.3788/AOS202040.1011001]
- Xiong X, Che N, Pan C, Xie X, Sun J, Barnes W L and Guenther B. 2006. Results and lessons from MODIS reflective solar bands calibration: pre-launch to on-orbit//Proceedings Volume 6296, Earth Observing Systems XI. San Diego: SPIE: 52-62 [DOI: 10.1117/12.679144]
- Xiong X X and Barnes W. 2006. MODIS calibration and characterization//Qu J J, Gao W, Kafatos M, Murphy R E and Salomonson V, eds. Earth Science Satellite Remote Sensing. Berlin: Springer: 77-97 [DOI: 10.1007/978-3-540-37294-3_5]
- Xu H L, Hu X Q, Xu N and Min M. 2015. Discrimination and correction for solar contamination on mid-infrared band of FY-3C/VIRR. Optics and Precision Engineering, 23(7): 1874-1879 (徐寒列, 胡秀清, 徐娜, 闵敏. 2015. FY-3C/可见光红外扫描辐射计中红外通道太阳污染的识别和修正. 光学精密工程, 23(7): 1874-1879) [DOI: 10.3788/OPE.20152307.1874]
- Xu H L, Hu X Q, Xu N, Zhang L Y and Qi C L. 2023. Construction and validation of FY-3C/VIRR infrared window channel refinement re-calibration model. National Remote Sensing Bulletin, 27(10): 2307-2317 (徐寒列, 胡秀清, 徐娜, 张里阳, 漆成莉. 2023. FY-3C/VIRR热红外通道精细化再定标模型的构建和精度验证. 遥感学报, 27(10): 2307-2317) [DOI: 10.11834/jrs.20231589]
- Xu N, Wu R H, Hu X Q, Chen L, Wang L and Sun L. 2015. Integrated method for on-orbit wide dynamic vicarious calibration of FY-3C MERSI reflective solar bands. Acta Optica Sinica, 35(12): 1228001 (徐娜, 吴荣华, 胡秀清, 陈林, 王玲, 孙凌. 2015. FY-3C MERSI反射波段在轨宽动态综合辐射定标方法. 光学学报, 35(12): 1228001) [DOI: 10.3788/AOS201535.1228001]
- Zhang B, Hu X Q, Zhou W W, Wang L, Chen L and Zhang P. 2023. Radiometric response evaluation of FY-3D/MERSI-II reflective solar bands based on deep convective cloud. Acta Optica Sinica, 43(18): 1828003 (张北, 胡秀清, 周为伟, 王玲, 陈林, 张鹏. 2023. 基于深对流云的FY-3D/MERSI-II反射太阳波段辐射响应评估. 光学学报, 43(18): 1828003) [DOI: 10.3788/AOS230842]
- Zhang L, Zhang P, Hu X Q, Chen L, Min M, Xu N and Wu R H. 2019a. Radiometric cross-calibration for multiple sensors with the moon as an intermediate reference. Journal of Meteorological Research, 33(5): 925-933 [DOI: 10.1007/s13351-019-9008-y]
- Zhang P, Lu N M, Li C R, Ding L, Zheng X B, Zhang X J, Hu X Q, Ye X, Ma L L, Xu N, Chen L and Schmetz J. 2020. Development of the Chinese space-based radiometric benchmark mission LIBRA. Remote Sensing, 12(14): 2179 [DOI: 10.3390/rs12142179]
- Zhang P, Lu Q F, Hu X Q, Gu S Y, Yang L, Min M, Chen L, Xu N, Sun L, Bai W G, Ma G and Xian D. 2019b. Latest progress of the Chinese meteorological satellite program and core data processing technologies. Advances in Atmospheric Sciences, 36(9): 1027-1045 [DOI: 10.1007/s00376-019-8215-x]
- Zhang Y P, Hu X Q, Yin D K and Gu M J. 2020. Onboard polarization calibration technique of multi-angle polarization imager based on sun glint from ocean. Acta Optica Sinica, 40(15): 1528002 (张一鹏, 胡秀清, 殷德奎, 顾明剑. 2020. 基于海洋耀斑的多角度偏振成像仪在轨偏振定标技术. 光学学报, 40(15): 1528002) [DOI: 10.3788/AOS202040.1528002]
- Zhao J Y, He Y Q, Hu X Q, Jin W Q, Zhang L J and Zhang D. 2021. Simulation of external stray light for FY-3C VIRR combined with satellite orbit attitude model. Remote Sensing, 13(24): 5037 [DOI: 10.3390/rs13245037]

- 10.3390/rs13245037]
- Zhao Y H, Wang H, Li Y F, Li Y and Zhang X Q. 2021. Research on high-precision radiation calibration technology of long-wave infrared space optical remote sensor. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(8): 1646-1654 (赵艳华, 王浩, 李云飞, 李岩, 张秀茜. 2021. 长波红外空间光学遥感器高精度辐射定标技术. *遥感学报*, 25(8): 1646-1654) [DOI: 10.11834/jrs.20211225]
- Zhou W W, Hu X Q and Yang L K. 2023. Modeling of BRDF characteristics of deep convective cloud based on Himawari-8 satellite imager. *Acta Optica Sinica*, 43(12): 1228007 (周为伟, 胡秀清, 杨磊库. 2023. 基于 Himawari-8 卫星成像仪的深对流云 BRDF 特性建模. *光学学报*, 43(12): 1228007) [DOI: 10.3788/AOS221771]
- Zhu J B, Hu X Q, Yang L K, Xu H L, Xu N and Zhang P. 2021. Study on the correction of sunlight pollution in mid-infrared image of FY-3C/VIRR. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(3): 803-815 (朱吉彪, 胡秀清, 杨磊库, 徐寒列, 徐娜, 张鹏. 2021. FY-3C/VIRR 中红外图像太阳光污染订正. *遥感学报*, 25(3): 803-815) [DOI: 10.11834/jrs.20209474]

Overview of historical data retrospective calibration for space-borne optical payloads

HU Xiuqing^{1,2,3}, WANG Ling^{1,2,3}, ZHANG Peng^{1,2,3}, XU Na^{1,2,3}, QI Chengli^{1,2,3}, XU Hanlie^{1,2,3}, HE Xingwei^{1,2,3}, HE Yuqing⁴, CHEN Lin^{1,2,3}, SUN Ling^{1,2,3}, LU Naimeng^{1,2,3}

1. National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather), China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
2. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
3. Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081, China;
4. Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and Systems, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract: After more than thirty years of effort, China's meteorological, land, ocean, and environmental disaster reduction constellations have formed a systematic and operational development trend. Domestically developed multi-series remote sensing satellites have accumulated long-term continuous observation data, which provide possibilities for climate change research and environmental change detection.

To unleash the enormous potential of satellite observation historical data in climate change research, it is necessary to address the high-precision radiometric calibration problem of remote sensing payloads between different satellites and throughout the entire lifespan of a single satellite. This requires the establishment of a unified historical radiometric reference and a refined recalibration model, ensuring the comparability of observation data from different instruments and different time periods.

This article provides an overview of the methods and approaches for historical data recalibration of spaceborne optical remote sensing instruments. It includes the development of radiometric reference models based on Earth-stable targets and celestial bodies such as the Moon, as well as the reconstruction of fine algorithm models for recalibrating long sequences of historical data. The paper systematically introduces how to construct radiometric reference models using Earth-stable targets such as deserts, ice and snow, DCC, as well as typical reference instruments and benchmark data evaluation for cross-calibration and benchmark traceability.

This article also reviews several key aspects that need to be considered when reconstructing recalibration models for optical payload historical data. This includes the influence mechanisms of stray light, ghosting, polarization, and other factors affecting radiometric calibration uncertainty. It discusses the establishment of short-period fluctuation correction models and long-period decay models for instrument response through full-link simulation of instrument calibration, fine reconstruction of key calibration parameters, and the construction of fine calibration mechanism models related to spatial, spectral, thermal, and orbital elements. The article explores multi-objective tracking of instrument response, calculation of long sequence wide dynamic range calibration coefficients, and the application of computational intelligence for relative calibration techniques. This allows for automatic recalibration and long-period decay correction of satellite historical data, as well as the establishment of radiation response and decay characteristic models within the lifespan of a single instrument. By providing the latest research progress on historical radiometric references, recalibration models, and analysis of calibration mechanisms, this article offers a systematic approach to the recalibration of China's historical remote sensing data. It lays the methodological foundation for further improving the long-term calibration quality and reliability of remote sensing data.

Key words: retrospective calibration, radiometric reference, fine recalibration model, calibration mechanism model, instrumental degradation model

Supported by National Key Research Development Program of China (No. 2022YFB3902900, 2022YFB3902901, 2018YFB0504901)