

光学遥感卫星在轨绝对辐射定标: 进展与趋势

马灵玲¹, 王宁¹, 高彩霞¹, 赵永光¹, 杨本永², 王新鸿¹, 韩启金³,
徐娜⁴, 宋培兰^{1,5}, 刘耀开¹

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. 中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥 230031;

3. 中国资源卫星应用中心, 北京 100094;

4. 国家卫星气象中心, 北京 100081;

5. 中国科学院大学 光电学院, 北京 100049

摘要: 在轨绝对辐射定标是光学遥感卫星数据量化应用的前提。载荷上天后, 由于星上定标基准传递链路复杂, 实现难度大, 而以地面目标测量为参照基准的场地定标受尺度效应、大气条件、环境变化等不确定因素影响, 时至今日, 遥感载荷在轨定标的精准性、一致性、可追溯性问题, 仍属亟待解决的国际难题。对此瓶颈问题的突破在于利用“定标星”搭载空间辐射基准载荷, 通过与其他卫星载荷同时观测目标场景的方式, 将高精度的空间辐射测量基准从天基标准辐射定标系统向光学遥感业务卫星传递, 并准确核算传递路径中各环节的不确定因素, 保证不同遥感卫星数据产品的高质量、一致、可追溯。本文从光学遥感在轨辐射定标技术需求出发, 回顾了星上定标、场地定标、交叉定标、月球定标等光学遥感卫星主要在轨辐射定标方法的发展历程及技术挑战, 介绍了当前国际前沿的空间辐射测量基准传递定标技术, 其将可溯源至SI的辐射基准源引入少量基准卫星, 通过同时观测相同地月目标场景的交叉定标方式将统一的高精度空间辐射测量基准传递至多系列卫星, 在大幅度提升定标整体水平的同时, 保证多源卫星数据质量的高一致性与高稳定性。

关键词: 光学遥感, 辐射定标, 基准传递, 可追溯性

中图分类号: P2

引用格式: 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

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 [DOI:10.11834/jrs.20222117]

1 引言

光学遥感一般指利用工作波段在可见光到热红外区间(0.38—15 μm)的遥感载荷, 以被动方式采集地物目标反射的太阳辐射或地物目标自身热发射辐射的远距离探测技术及其信号分析处理技术。光学遥感作为最基本、也是最早发展起来的一类遥感技术, 广泛应用于农业、林业、地质、环保、海洋、气象、测绘、水文、生态、减灾等众多领域, 为国民经济持续稳定发展提供了大量动态基础数据和科学决策依据。在过去几十年中,

中国空天遥感技术呈现爆发式发展, 截止目前在轨运行的民用对地观测卫星超过60颗, 形成了“风云”、“海洋”、“资源”、“高分”、“遥感”、“天绘”等多个对地观测卫星体系(http://chinageoss.cn/report/cedr2019_files/CEDR2019.pdf[2021-11-10])。据统计, 2021年—2025年, 中国还将发射超过50颗的民用和商业对地观测卫星, 届时中国在轨运行的对地观测卫星将超过100颗, 其中半数以上为光学遥感卫星。随着遥感应用向量化方向发展, 人们逐渐认识到, 遥感对地物目标信息的精准获取, 从根本上取决于对遥感载荷性能及其长

收稿日期: 2022-03-18; 预印本: 2022-07-22

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2018YFB0504800, 2018YFB0504805, 2018YFB0504900, 2018YFB0504903)

第一作者简介: 马灵玲, 研究方向为光学遥感定标与产品真实性检验。E-mail: llma@aoc.ac.cn

通信作者简介: 王新鸿, 研究方向为红外遥感定标与地表参数反演。E-mail: xhwang@aoc.ac.cn

期业务运行期间状态变化的综合定标。作为遥感载荷→观测数据→信息产品这一技术链路的源头,遥感载荷辐射定标用于刻画遥感载荷自身辐射性能在生命周期内的变化,对于遥感数据及信息产品量化应用的效果至关重要。然而遥感的非接触探测特点也给光学遥感卫星载荷的在轨辐射定标带来了极大挑战。

遥感载荷绝对辐射定标是确定载荷输出信号与入射辐射量之间定量关系的过程(GB/T 38236—2019航天光学遥感器实验室辐射定标方法),进而通过连续的链路将遥感载荷与参考辐射基准源相联系,保证载荷生命周期内的数据与产品质量。光学遥感载荷辐射定标一般包括发射前定标和发射后在轨定标。虽然发射前定标能够使用已知特性的辐射源在可控环境中进行测试,具有可在载荷上天前探查并解决异常的优势,但掌握载荷特性在发射后的变化对于获取高质量的数据产品更为关键。由于遥感载荷在实际工况下运行并获取遥感数据的过程中,受到发射/飞行过程中的震动、工作环境和气压的改变以及元器件老化等因素影响,诸如长期暴露于紫外线下引起的光学器件衰变等问题会导致载荷的实际性能发生变化,若仍旧沿用发射前测得的定标系数进行数据处理,往往无法保证遥感数据产品的准确度。除非有所补偿,这些变化会让人误认为是被测目标物的变化。以美国EO-1/Hyperion载荷为例,其入轨运行的前两年间可见光—近红外谱段出现8%的漂移,短波红外谱段漂移更是高达18%,而在其后的10年间年际平均变化超过1%(Franks等,2017);美国可见光红外成像辐射仪NPP/VIIRS(Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)的旋转镜表面涂层在紫外线照射下产生钨/氧化钨,发生了光致变色效应,在发射后7天退化了约1%,个别波段在其后近一年半的时间里退化了约30%。因此在轨辐射定标必须在真实的卫星在轨运行条件下开展,其目标是测量上天前无法测定的实际工况下的载荷参数,在载荷运行生命期内维持定标结果的可用性、量化定标不确定度,以及在必要时对定标系数进行更新以满足观测需求(Tansock等,2015)。

自20世纪70年代第一颗美国陆地卫星搭载MSS内置定标灯以来,国际空间大国就一直致力于在轨辐射定标技术的研究,发展出了星上定标、场地定标、交叉定标等多种方法,用以及时监测

遥感载荷运行过程中性能动态变化、精确检测变化程度、准确发现变化的原因并制定针对性的补救措施。如Landsat、SPOT等系列卫星地面系统中的图像评估系统(IAS)(Irons等,2012)、图像质量中心(QIS)(<http://spot5.cnes.fr/gb/systeme/exploitation.htm>[2021-11-10])均以遥感载荷定标作为遥感数据质量控制的重要手段。随着遥感技术在全球化发展中展现出越来越大的潜力,人们认识到利用其解决人类面临的诸多全球性问题必然需要长时间序列、多星多载荷遥感数据产品的综合利用。1984年成立的国际卫星对地观测领域的权威性非政府组织——国际对地观测卫星委员会CEOS(Committee on Earth Observation Satellites)在其最早创立的工作组中就包括了定标与真实性检验工作组WGCV(Working Group on Calibration and Validation),致力于在国际对地观测卫星的定标和真实性检验方面增强协调、联系和合作,确保对地观测资料定量、准确、长时期可比较(<https://ceos.org/ourwork/workinggroups/WGCV>[2021-11-10])。在2003年CEOS/WGCV的红外与可见光光学传感器专业技术组IVOS(Infrared and Visible Optical Sensors Subgroup)研讨会上曾指出“当前的在轨定标方法可以为载荷稳定性监测提供支持,但是对于面向长期气候变化研究及未来可持续发展的绝对准确度而言还远远不够”。

对此瓶颈问题的突破在于将实验室中所使用的标准参考源移至卫星平台,通过引入可溯源至SI的空间辐射基准源,实现对所搭载卫星载荷的高精准定标,这也21世纪初欧洲和美国先后提出TRUTHS(Traceable Radiometry Underpinning Terrestrial- and Helio- Studies)和CLARREO(Climate Absolute Reflectance and Refractivity Observatory)“定标星”计划核心理念(Fox等,2003;Anderson等,2004)。进一步地,以“定标星”作为基准,利用交叉定标的方式可实现对其他卫星载荷的在轨定标。虽然“定标星”的空间辐射基准源仍处于探索阶段,且欧美“定标星”计划由于经费问题被多次推迟,但是这种通过为其他载荷提供统一且可溯源至SI标准参考源的定标方法,作为极大提升星上定标精准度、促进多源卫星数据质量长期的高一致性与高稳定性的有效途径,必将成为未来光学遥感在轨辐射定标技术发展的主导趋势。

本文从阐述光学遥感卫星载荷在轨辐射定标技术需求及相应技术挑战出发，回顾光学遥感卫星载荷在轨辐射定标技术研究进展，对于星上定标、场地定标、交叉定标、月球定标等代表性的在轨辐射定标技术的发展历程及发展现状进行了阐述分析，并介绍了目前国际前沿的空间辐射基准传递定标技术。

2 光学遥感卫星在轨辐射定标技术需求与挑战

2.1 精准性

精准性是遥感载荷在轨辐射定标中最基本也是最重要的要求。精准性包括准确（accuracy）和精确（precision）两方面的内涵。其中，准确性指的是多次测量的平均值与被测物理量真值的接近程度，常用误差表示，误差越小，准确度越高；精确性指的是多次测量值的集中程度，在相同条件下将测试方法多次实施，求出所得结果之间的一致程度，其大小常用偏差表示，也可用重复性和再现性表示。图1描绘了准确性和精确性这两个测度之间的差别和联系。只有准确性和精确性俱佳的遥感数据才能最大程度地满足行业应用的实际需求。

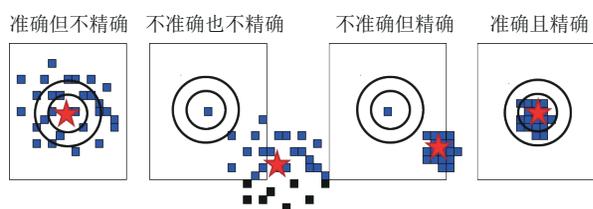


图1 准确性与精确性涵义示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the concepts of accuracy and precision

遥感载荷定标需求随应用方向而不同。例如，大气科学应用有关的载荷会受大气效应的影响，故这类载荷必须测定偏振和光谱响应方面的属性，以便补偿大气的偏振效应或光谱散射、吸收以及发射效应。对于海色研究，大气层顶 TOA (Top of Atmosphere) 辐亮度测量不确定度要求优于0.5%，而要达到这种级别的准确度，偏振、杂散光、响应非线性度等因素引起的不确定度贡献需要控制在0.1%的量级上 (Tansock等, 2015)。对于陆地遥感，为了监测地表特性的变化，需要在大气校

正之前利用辐射定标系数对载荷观测数据进行校正，否则反演的地表参数产品会出现系统误差。例如，干旱监测在分析植被的年际变化的时候一般会用到超过10年的数据（例如NDVI），载荷定标未能检测到的载荷性能变化有可能就会被误解译为植被胁迫或干旱 (Wang等, 2012)。大气遥感中，红外辐射计和红外光谱仪通过 $15 \mu\text{m}$ (667 cm^{-1}) 附近二氧化碳波段来反演大气温度，从科学需求上来说大气温度不确定度应小于1 K (Datla等, 2011)，这要求载荷在轨辐亮度测量的不确定度在 $1.36\% @ 270 \text{ K} - 2.2\% @ 210 \text{ K}$ ，考虑还有载荷自身非均匀性等误差来源，载荷绝对辐射定标不确定度需要小于1%。表1列出了不同应用对于光学遥感载荷的在轨辐射定标准确度需求。

由于技术上的革新，过去几十年间光学载荷在轨辐射定标准确度一直在逐步提升。以可见光近红外 (VNIR) 和短波红外 (SWIR) 谱段为例，Terra 和 Aqua 卫星上的 MODIS 载荷、以及后来的 Sentinel-3/OLCI 载荷，定标准确度均要求达到2% ($k=1$) 以内 (Justice等, 1998; Xiong等, 2005, 2006)；云和地球辐射能量系统 CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) 则要求优于1% ($k=1$) 的定标准确度 (Gorroño等, 2017)。但是由于遥感载荷观测信号在辐射传输及接收过程中，与地面、大气以及载荷光电系统发生的复杂作用，给气候变化应用等更高数据要求的载荷在轨辐射定标带来极大挑战。

2.2 一致性

一致性 (consistency) 指的是不同遥感载荷或同一遥感载荷在不同观测时间对于相同目标的观测数据或者反演信息在物理意义和数值上的统一性和相似性。在遥感数据处理和信息生产过程中，数据来源、操作流程、处理方法等因素往往造成数据和信息产品显示出不同的信息表达。即使是同一载荷，由于观测条件以及运行过程中不可避免的性能变化，在不同时期对同一地物目标获取的数据信息表达也会出现差异，如图2所示，在 FY-3A/MERSI (MEdium Resolution Spectral Imager, 中分辨率光谱成像仪) 载荷对伪不变定标场 PICS (Pseudo-Invariant Calibration Sites) Libya4 的观测值中，存在由于载荷辐射响应退化引起的

TOA 反射率随时间递减的现象 (Kim 等, 2014)。对于不同载荷, 在同一时间对同一地物目标获取的数据及信息产品也往往呈现出不一致现象, 图3展示了 Terra 和 Aqua 卫星上具有相同通道设置的 MODIS 载荷在 0.65 μm 和 1.24 μm 通道获取的深对流云 DCC (Deep Convective Cloud) 时间序列观测数据 (Doelling 等, 2015), 可以发现单个卫星上的 MODIS 载荷对于稳定目标的观测辐亮度一致性较好 (十多年来变化小于 1%), 而不同卫星搭载

的 MODIS 载荷对相同目标得到的测量值 (TOA 反射率) 存在约 1.2% 的差异。造成上述现象的主要原因在于, 虽然 Terra 和 Aqua 卫星上 MODIS 载荷的星上定标原理一致, 但不同卫星的漫射板退化毕竟有差异, 由此带来星上定标结果的不同。因此, MODIS 在以“太阳+漫射板”定标为主的同时, 还利用深对流云、月球、PICS 场地等稳定目标对定标结果进行验证, 并且对其发布的数据产品进行版本更新, 从而保证定标结果的一致性。

表 1 不同应用的遥感辐射定标准确度需求 (Datla 等, 2011)

Table 1 Accuracy requirements of remote sensing radiometric calibration for different applications (Datla et al., 2011)

观测要素	使用的观测设备	准确度	稳定性(10年)	
太阳辐射、地球辐射平衡和云参数	太阳辐照度	辐射计	1.5 W/m ²	0.3 W/m ²
	地表反照率	可见光辐射计	5%	1%
	净太阳辐射: TOA	宽波段太阳辐射计	1 W/m ²	0.3 W/m ²
	出射长波辐射: TOA	宽波段红外辐射计	1 W/m ²	0.2 W/m ²
	云底高度	可见/红外辐射计	1 K	0.2 K
	云光学厚度	可见辐射计	5%	1%
	云顶高度	红外辐射计	1 K	0.2 K
	光谱分辨热辐射	红外光谱辐射计	0.1 K	0.04 K
大气参数	对流层温度	微波或红外辐射计	0.5 K	0.04 K
	平流层温度	微波或红外辐射计	1 K	0.08 K
	水汽	微波辐射计	1.0 K	0.08 K
		红外辐射计	1.0 K	0.03 K
	臭氧柱总量	紫外/可见光谱仪	2% (波长相关)	0.2%
			1% (波长无关)	
	平流层臭氧	紫外/可见光谱仪	3%	0.6%
	对流层臭氧	紫外/可见光谱仪	3%	0.1%
气溶胶	可见光度计	辐射精度: 3% 极化精度: 0.5%	辐射精度: 1.5% 极化精度: 0.25%	
二氧化碳	红外辐射计	3%	强迫研究: 1% 源汇研究: 0.25%	
地表参数	水色	可见辐射计	5%	1%
	海表温度	红外辐射计	0.1 K	0.01 K
	海冰面积	微波辐射计	0.03 K	0.01 K
	雪覆盖	可见辐射计	12%	10%
	植被	可见辐射计	2%	0.8%

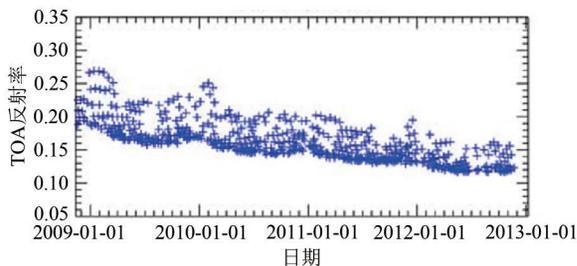


图2 FY-3A/MERSI对Libya4观测的TOA反射率时间序列 (Band 8)

Fig. 2 Time-series TOA reflectance derived by FY-3A/MERSI data through observing the Libya4 site (Band 8)

随着卫星遥感技术的蓬勃发展, 星座组网的多卫星多载荷协同观测技术成为当前的卫星产业发展热点。国内高分系列、资源系列卫星均尝试双星组网观测, “高景一号”卫星是中国首个自主研发的高分辨率商业遥感卫星星座, 全色分辨率 0.5 m、多光谱分辨率 2 m, 四星组网后全球任一地点皆可实现一天重访 (中国遥感应用协会组, 2021), 欧比特高光谱卫星星座、长光卫星均采用多星组网的方式提供商业卫星数据服务。在国外,

由美国行星实验室 (Planet Labs Inc.) 主导发射的 Dove 小卫星星座 (包含 190 多个小卫星) 实现了近乎每天 3 m 高空间分辨率的全球覆盖, 为监测地表精细尺度的变化提供了前所未有的机会。为了保证星座内部不同卫星数据一致性, 同类载荷的设计参数非常接近、在数据处理过程中也采用相同的处理算法。然而, 不同卫星载荷在轨运行中的辐射特性变化通常难以保证一致, 利用场地定标或交叉定标手段进行性能跟踪受到卫星运营方的广泛重视。在 2016 年的 CEOS/WGCV 全球自主辐射定标场网 (RadCalNet) 首次用户测试期间, 美国 WorldView-2/3、RapidEye、DOVE 小卫星星座、俄罗斯 Resurs-P 等卫星均踊跃申请参与。美国地质调查局 (USGS) 美国地球资源观测与科技中心 (EROS) 2018 年组织 NASA、USGS、ESA、Planet、Maxar 等多家单位的专家开展了关于 “Optical Satellite Calibration and Quality Comparison: How Good are Smallsat Data?” 的专题讨论, 提出综合利用伪不变定标场、交叉定标、研制基准载荷等定标手段来保证多载荷观测数据一致性, 并倡议各空间组织和机构应进一步加强合作交流, 以实现遥感载荷高精度定标并加速促进地表产品一致性的提升 (Helder 等, 2020)。

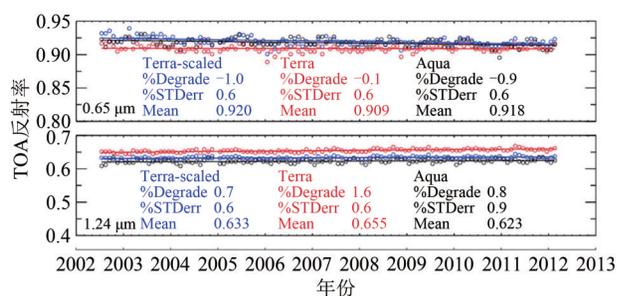


图3 Terra/MODIS和Aqua/MODIS在不同时间对DCC观测的TOA反射率差异对比图 (Degrade表示下降率, STDerr表示二次拟合的标准差, Mean表示平均记录增益)

Fig.3 Time-series TOA reflectance difference derived by Terra/MODIS and Aqua/MODIS through observing DCC (Degrade is the declination, STDerr is the standard deviation via quadratic fitting, Mean is the averaged gain)

2.3 可追溯性

可追溯性 (traceability) 指的是 “一串不曾中断的文档记录或一条不曾中断的测量链路, 以及与它们有关的不确定度” (Tansock 等, 2015)。计量意义上的可追溯性依赖于 3 个原则: (1) 遥感产品和数据可以通过一条连续的链路追溯到 SI

(Système International, 国际单位制) 基准; (2) 分析整个传递链路中各因素的不确定度, 计算数据和产品的总不确定度; (3) 通过比对来验证数据和产品的不确定度 (Ma 等, 2020)。

载荷未上天之前, 可以通过严格的实验室定标, 确保定标结果的可追溯性。载荷上天后, 由于测试基准传递链路断裂, 遥感观测数据难以真正溯源至 SI。以太阳反射谱段为例, 星上定标器 (如太阳漫射板) 的性能在卫星在轨状态下无法追溯至实验室计量基准, 从而带来卫星载荷辐射观测数据的质量追溯难题。载荷在轨运行期间, 通过观测地面参考目标的方式, 获得可与卫星观测比对的辐射基准, 是弥补遥感载荷上天后传递链路断裂的有效途径, 也是当前中国遥感载荷在轨辐射定标的主要技术手段。而且, 并不是所有遥感载荷都配有星上定标器, 随着大量低成本遥感卫星的发展, 如何利用地面参考目标进行定标 (这种方式称为场地定标或外场定标) 已成为主流的定标技术之一。在场地辐射定标时, 利用经实验室定标的外场仪器或设备, 获取可追溯至实验室 SI 基准的地面测量值, 进而经由大气辐射传输模拟至卫星高度的过程中, 考虑地面参考目标特性及卫星过境时刻成像条件、地表及大气参数测量条件、辐射传输模型误差等诸多影响辐射传输过程的因素, 并将各因素不确定性进行量化, 即可构建涵盖全过程各环节的完整基准传递链路。尽管场地定标由于溯源链路长导致不确定度较大, 但其毕竟提供了一种可将载荷观测数据与实验室辐射测量基准相链接的技术手段, 能够保证不同卫星载荷在轨观测数据之间的可比性, 从而实现具备统一质量标准的产品融合应用。

2007 年以来, CEOS 开展了对地观测质量保证框架 QA4EO (A Quality Assurance framework for Earth Observation) 计划 (GEO 和 CEOS, 2012), 以支持地球观测组织 (GEO) 建立全球对地观测综合系统 (GEOSS)。QA4EO 以对地观测数据产品的质量追溯为核心, 基于 “可访问性/可用性” (Accessibility/Availability) 和 “适用性/可靠性” (Suitability/Reliability) 两大主要原则, 研究如何量化产品质量、建立产品质量指标体系, 以及如何评价产品准确度、建立真实性检验规范。由于遥感载荷定标误差是导致数据产品不确定性的主要原因之一, 而该过程是与航天、航空及地面遥

感测量仪器系统直接相关的实验研究过程,为了尽可能降低定标不确定度并保证数据产品质量的可追溯性,CEOS相继制定了月球定标、地面测试仪器交叉比较、瑞利散射绝对辐射定标、地基校验场构建、校检场特性、海洋水色遥感及水下探测等8项规范,这些规范被纳入QA4EO并被GEO采纳。

3 光学遥感卫星在轨辐射定标研究进展

3.1 星上定标

星上定标利用卫星搭载的星上定标系统来实现遥感载荷在轨辐射定标,具有高频次、高效率、高精度(Wang等,2019)等优点。光学载荷星上定标采用的定标光源包括标准灯、太阳光、黑体等。

1972年美国第一颗陆地卫星Landsat-1搭载“标准灯”,开始将星上定标方法应用于遥感载荷的在轨辐射定标(Helder等,2012),此后经历了“标准灯+漫射板”(Chander和Markham,2003;Zhou等,2015;Williams等,1985)、“标准灯+积分球”(Fox等,2002;Zhou等,2015;Mendenhall等,1999;Gellman等,1993;Markham和Helder,2012),直到目前主流的“太阳+漫射板”(Markham等,2004,2014;Labandibar等,2004)的全孔径全光路高精度星上定标的发展历程。早期的星上定标方法利用标准灯照射反射率已知的漫射板(或积分球)来实现载荷在轨定标,但由于标准灯和漫射板(或积分球)只能从光路中间某个部位切入,造成“标准灯+漫射板”(或“标准灯+积分球”)的方式无法实现全光路定标,因此其也被称作“内定标”(IC)法。并且随着点灯次数和点灯时间的增加,标准灯的性能会发生严重衰退,如Landsat 7搭载的定标灯主灯辐射性能在大部分波段以每年约1%的速度衰退,这使得其测量结果仅被用于自身的稳定性跟踪而非载荷辐射性能校正(Barisi等,2016)。

太阳是一个高度稳定的辐射源,从1984年—1999年的地球辐射量卫星(ERBS)实测资料可知,太阳辐射的变化不超过0.2%(陈海龙,2003)。因此,“全孔径太阳定标(FASC)”法以太阳作为辐射参考基准,调整平台姿态,将太阳

光引入载荷内部,并利用漫射板使得辐射降低到载荷响应的动态范围内,实现载荷全光路的定标。此方法依赖于地面实验室对太阳漫射板二向性反射率分布函数BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)的准确测量,以及太阳漫射板在太空环境中受紫外辐射、质子轰击等因素影响的性能衰减(杨本永等,2009)。因此,对太阳漫射板全寿命期BRDF量值的监测和修正是保证遥感载荷星上定标精度的关键。国际上主要采用标准探测器、备用太阳漫射板、比辐射计等来监测太阳漫射板的衰减情况。例如,SeaStar/SeaWiFS和ENVISAT/MERIS分别采用标准探测器和备用漫射板来监测太阳漫射板的衰减情况(贾迪等,2018)。但是由于标准探测器和备用漫射板也会随着时间的推移发生衰减,如MERIS在2011年3月工作时长为37 min,备用漫射板的反射率衰退了0.2%(Bourg和Delwart,2006),因此1999年起MODIS载荷采用比辐射计作为漫射板的稳定性监视器,比辐射计分别交替观测入射的直射太阳光、太阳漫射板反射的太阳光,并通过对比二者的观测值来监测和跟踪太阳漫射板BRDF的衰减,这大大改善了定标稳定性,能够达到优于1%(Doelling等,2015)。随后,NPP/VIIRS也采取了同样的定标方案(Xiong和Butler,2020),定标稳定性达到2%。中国FY-3A/MERSI采用陷阱探测器来监测星上定标器的输出变化,两者的搭配使得MERSI星上辐射定标的不确定度可达5%(胡秀清等,2013;Xu等,2018)。

对于红外发射谱段的星上定标而言,自从1978年美国国家航空航天局NASA(National Aeronautics and Space Administration)发射的热容量制图辐射计HCMR(Heat Capacity Mapping Radiometer)(Barnes和Price,1980)首次搭载红外星上定标系统以来,大多采用星上黑体和深冷空间作为高、低温辐射参考进行定标,定标准确度主要取决于黑体自身的发射率及稳定性。参考黑体的发射率一般达0.995以上,腔式黑体温度均匀性可达 ± 0.1 K,稳定性为 ± 0.1 K/30 min(盛一成等,2019)。若黑体温度可调,则可得到多个等级的定标点。MODIS星上黑体采用一种全孔径V形槽平板面黑体,表面发射率可达0.997;具有良好的温度均匀性,其波动在0.03—0.08 K的范围内,黑体辐射覆盖了整个仪器的入射口径,属于全光

路定标, 这使得MODIS及其后续的NPP/VIIRS热红外波段定标准确度优于 ± 0.2 K (Chang和Xiong, 2011)。2009年底升空的美国Landsat-8的热红外探测器TIRS的星上定标与MODIS类似, 采用一种全孔径V形槽平板曲面黑体进行全光路定标。由于技术和星体结构的限制, 中国早期星载辐射计只在后光路设置了定标黑体, 无法实现全光路的黑体定标, 在定标算法中需要计算主镜和次镜等前光路组件的辐射贡献, 这个过程会引入一定误差, 例如FY-2/VISSR (郭强等, 2013)。随着技术的发展, 中国红外载荷星上定标能力有所提升。2017年发射的FY-3D/HIRAS采用的黑体辐射源的发射率优于0.997、控温稳定性优于0.1 K (胡朝云等, 2019), 其红外波段定标准确度为0.3—0.5 K (Qi等, 2020)。FY-4A/AGRI实现了全口径、全光路的黑体定标, AGRI热红外波段定标准确度为 ± 0.5 K (耿晓雯等, 2020), 相比而言距离国际先进水平依然有一定距离。

针对不断提高的光学卫星辐射观测精度要求, 近年来国际上提出了把可溯源至SI的辐射基准源搭载至卫星上的“空间辐射基准”的技术思路, 如欧洲2003年提出的TRUTHS计划 (Fox等, 2003, 2017), 计划搭载的低温太阳辐射计自身不确定度 $<0.01\%$, 可实现辐射基准载荷反射波段定标不确定度 $<0.3\%$; 美国2007年提出的CLARREO计划 (Anderson等, 2004; Wielicki等, 2013), 星上定标黑体发射率约为0.9999, 温度不确定度约为25 mK, 可实现辐射基准载荷发射波段定标不确定度 <0.1 K。中国从“十二五”以来先后部署了863计划项目“空间辐射测量基准源研制”、“太阳反射谱段空间辐射基准载荷技术”、“红外发射谱段空间辐射基准载荷技术”, 计划在2022年完成原理样机的研制, 通过低温电替代、参量下转换辐射源、相变固定点空间基准黑体辐射源 (Hao等, 2020, 2022; Sima等, 2021; Song等, 2020) 等关键技术突破, 实现太阳总辐照度和光谱辐照度、地球反射辐亮度和辐射亮温的绝对测量能力 (卢乃锰等, 2020; Zhang等, 2020)。虽然空间辐射基准仍处于探索阶段, 但它是极大提升星上定标准确度、解决遥感卫星高精度长期稳定观测问题、确保多源卫星数据质量一致性的有效途径, 也必将成为未来星上定标技术发展的主导趋势。

主要的星上定标方法的特点总结见表2。纵观

卫星光学遥感器星上定标发展过程, 有如下发展规律和趋势: (1) 星上定标过程纳入越来越多的遥感载荷器件, 由半光路定标向全光路定标发展; (2) 星上定标源由点源向小面源、大面源直至充满全孔径全视场发展; (3) 星上定标源的稳定性逐渐增强, 如反射谱段由标准灯到利用漫射板引入太阳光, 并加入对星上定标系统 (积分球/漫射板) 稳定性进行监测的标准探测器, 红外星上定标也是一直致力于提升黑体发射率并增强其稳定性。

3.2 场地定标

20世纪80年代, Slater等提出了利用辐射校正场对在轨卫星载荷进行绝对辐射定标的方法 (Slater等, 1987; Biggar等, 1990; Frouin和Gautier, 1987), 即场地定标 (亦称外场定标)。根据地面同步测量参数的差异, 太阳反射谱段场地定标方法包括反射率基法、辐照度基法和辐亮度基法。

反射率基法是指遥感载荷过境的同时, 在辐射定标场进行地面参考目标反射率和大气光学参量的同步测量, 然后利用大气辐射传输模型计算出载荷表观辐亮度, 建立载荷获取图像DN值与地面对应像元表观辐亮度之间定量关系的一种方法 (Slater等, 1987; Frouin和Gautier, 1987; Thome, 2001)。反射率基法需投入的测试设备和获取的测量数据相对较少, 因此被广泛采用, 国际上从20世纪80年代开始, 对Landsat 4/TM、Landsat 5/TM、Landsat 7/ETM+、Landsat 8/OLI、SPOT/HRV、Terra/MODIS、Terra/ASTER、GOES-5/-6/VISSR、NOAA-7/AVHRR等 (Slater等, 1987; Biggar等, 1991, 1994; Thome, 2001; Thome等, 2003, 2004a, b, 2008; Chen等, 2013; Czapla-Myers等, 2007) 以及中国FY-1C/MVISR、CBERS-04/WFI、FY-3A/MERSI、ZY-3/MUX、Landsat 8/OLI (张玉香等, 2002; 刘李等, 2016; 孙凌等, 2012; 韩启金等, 2013; Liu等, 2017) 等众多光学载荷开展了基于反射率基法的场地定标, 不确定度约为5%—7%。

辐照度基法是对反射率基法的改进, 它将气体吸收引起的消光与散射作用分离开来, 并进行实际测量, 在外场试验中除了需要对参考目标表面反射率和大气参数进行同步测量外, 还需测量参考目标表面的漫射辐照度和总辐照度 (Biggar

等, 1990)。Thom 等首次将辐照度基法应用于 Landsat 5/TM, 结果表明其定标不确定度约为 3.5%, 随后研究学者采用辐照度基法对 Landsat 5/TM、SPOT/HRV、Terra/MODIS、FY-1C/MVISR、CBERS/CCD (Thome 等, 1997; Wei 等, 2016; Smith 等, 1998; Holmes 和 Thome, 2001; 胡秀清

等, 2003; 张冬英 等, 2002) 等光学载荷开展了场地定标。辐照度基法虽然降低了反射率基法中由于气溶胶散射近似带来的误差, 但由于漫射/总辐照比的测量在高纬度地区会产生较大误差, 给辐射传输模拟将带来一定不确定性。

表2 星上定标方法对比

Table 2 Comparison of on-orbit calibration methods

谱段	方法			预期 不确定度	应用案例	优缺点	
	类型	主要技术构成	定标光路 定标视场				
灯灯 定标	灯	半光路(探测器前)	半口径	—	Landsat 1/MSS		
	灯+漫射板	半光路(中继光学系统前)	半口径	5%	Landsat 5/TM, CZCS	优点: 可实现高频次实时定标; 系统轻巧独立, 方便内置布设; 方式灵活, 功能多样 缺点: 光源尺度小, 很难实现全系统定标; 扩展光路及自身衰变不可预估; 光谱匹配非一致性, 高精度定标谱段受限; 灯和标准探测器自身衰变无法评估	
	灯+积分球	半光路(中继光学系统前)	半口径	3%—5%	EO-1/ALI, SPOT-2/HRV, Landsat 7/ETM+, Landsat 8/OLI		
	灯+积分球+标准探测器	主光学系统前	半口径	2%—5%	FY-3A/MERSI		
太太阳 反射谱段	太阳光入射积分球	前置光学系统后	全口径	5%	FY-3A/MERSI	优点: 与载荷光谱匹配度高 缺点: 难实现全光路定标, 难克服自身衰变, 定标时机受限; 积分球自身衰变无法评估; 太阳入射角度不定, 几何订正模型不确定度大	
太阳 定标	太阳光照明漫射板	入瞳前端	全口径	5%—7%	Landsat 7/ETM+	优点: 可实现全孔径、全光路、全谱段定标 缺点: 太阳光谱、漫射板自身衰变不可控	
	太阳光照明漫射板+备用漫射板	入瞳前端	全口径	5%	ENVISAT-1/MERIS, Landsat 7/ETM+, Landsat 8/OLI	优点: 可实现全孔径、全光路、全谱段定标 缺点: 漫射板 BRDF 在发射前标定, 漫射板自身衰变不可控	
	太阳照明漫射板+监视探测器	入瞳前端	全口径	3%	Terra/MODIS, Aqua/MODIS, NPP/VIIRS	优点: 可实现全孔径、全光路、全谱段的高精度定标 缺点: 精度依赖于发射前 BRDF 定标	
	太阳照明漫射板+标准探测器	入瞳前端	全口径	2%—5%	SeaStar/SeaWiFS; MISR	优点: 可实现全孔径、全光路、全谱段的高精度定标; 星上实时标准传递, 可实现更高的精度 缺点: 标准探测器稳定性不易验证	
红外 发射 谱段	黑体 定标	变温黑体	后光路	半口径	1—2 K	FY-2/VISSR, CEBERS-01/02	优点: 定标结构相对简单, 系统空间资源耗费较小 缺点: 对于后光路定标的载荷, 难以保证全系统定标精准度
			后光路	全口径		HJ-2A/2B	
			全光路	全口径		HJ-1B/IRS	
	变温黑体+冷空间	全光路	全口径	0.2—0.5 K	Terra/MODIS, Aqua/MODIS, NPP/VIIRS, FY-4A/AGRI, FY-3A/MERSI	优点: 可实现全光路、全孔径定标 缺点: 需要较为富裕的星上空间资源	

辐亮度基法是在卫星过境的同时, 使用飞机搭载经过准确定标的机载遥感载荷, 在一定的海拔高度上, 以与星载遥感载荷相同的几何观测角进行同步测量, 并在修正卫星与飞机之间的大气影响差异之后, 推算星载遥感载荷的表观辐亮度,

最终实现星载遥感载荷的辐射定标。Kriebel (1981) 首次尝试了利用光谱范围为 400—1100 nm、定标不确定度为 3% 的单通道辐射计搭载至 11 km 高度的飞机上, 实现了 Meteosat 可见光通道 5% 的定标不确定度; Slater 等 (1987) 在美国白沙测试

场进行了辐亮度基法定标试验, 将四通道辐射计搭载在飞行高度为 3000 m 的直升机上以实现 Landsat 4/TM 辐射定标, 其与反射率基法定标结果一致性在 5% 以内; Abel 等 (1993) 利用航空飞机搭载定标不确定度为 2% 的 NESDIS-SEL 载荷在美国白沙测试场开展了 NOAA-11/AVHRR 辐亮度基法定标试验, 分析表明采用辐亮度基法定标的不确定度为 3.8%。辐亮度基法直接观测地表反射辐亮度, 且所需订正的残余大气较少, 故受气溶胶的影响较小。但是该方法定标准确度较依赖于搭载在飞机上的辐射计, 而且由于需要飞机的辅助实施, 定标所需费用高, 实施难度较大, 实际应用相对受限。

总的来说, 传统的太阳反射谱段场地辐射定标方法主要存在如下两方面问题: 其一, 大多采用人工同步测量的方式获得场地的反射光谱特性和大气环境数据, 受限于定标场地目标特性、卫星过境时刻观测几何、地表及大气参数等测量中多种不确定因素的影响, 场地辐射定标的精度一般认为在 5%—7% 左右; 其二, 辐射定标场一般处于戈壁、沙漠、降水少的大面积湖泊等偏远地区, 受限于卫星过境时刻成像条件、地表及大气测量条件, 定标系数一般每年仅更新一次, 难以及时准确校正载荷辐射性能的退化情况, 而且由于每次测量环境条件差异, 即便是同一定标场地也无法保证测量条件的复现性, 导致不同时间、不同场地的定标不确定度均有不同, 无法保证载荷在不同时间获取信息的一致性, 不同载荷获取的信息更难以准确比对, 因此国际上往往将场地定标作为一种验证手段。长期以来中国遥感卫星载荷在轨定标主要依赖于每年一次的场地定标, 难以准确反映卫星载荷的性能衰变。

提高定标频次最直接的方法是建设更多地理分布不同的定标场, 增加定标机会。CEOS/WGCV 自 1984 年以来就一直致力于全球范围内辐射定标场的优选, 已选择了 49 个分布于不同地域且差异显著的辐射定标场, 统称为 CEOS 参考标准测试场 (CEOS Reference Standard Test Sites) (Berthelot 和 Santer, 2009)。这些场地大部分分布在沙漠、干湖床、冰雪覆盖地区, 场区地表覆盖均一性高且面积足够大, 并且不同地物类型场地之间的辐射特性存在较大差异, 能够较好地满足光学遥感载荷的在轨绝对辐射定标所需的参考目标宽动态要

求。按照场地是否有条件装备测试仪器开展外场测试, CEOS 参考标准测试场分为陆地装备场 LES (Land Equipped Sites) 和陆地非装备场 LNES (Land Non-Equipped Sites) (Santer 和 Berthelot, 2009)。陆地装备场可以装备各种地面测量仪器开展外场绝对辐射定标和辐射性能检测; 陆地非装备场由于地处沙漠、戈壁、冰原等人迹罕至、交通不便地区, 不具备开展外场测试的条件, 主要用于对辐射定标和辐射性能检测结果进行验证。然而, 即使是 LES, 多数也没有可常态化观测目标/大气光学特性的设备, 仍然以人工测量为地面同步测量数据获取的主要手段, 存在外场测试中难以克服的时空同步性差、效率不高、不同操作人员数据采集手法难以完全一致等问题, 距离高频次、一致性的全球多场地联合定标的初衷依然相差甚远。

为了解决场地辐射定标对人工依赖性强、长期获取地面同步数据困难等问题, 近年来国际上逐渐出现了自动化场地辐射定标的新思路。其以无需人工同步测量为特点, 采用无人值守的自动化观测设备获取场地的地表和大气参数数据, 可实现卫星光学载荷的高频次在轨辐射定标 (Czapla-Myers 等, 2010; 李新等, 2014; Wang 等, 2017; 庞博等, 2019; Ma 等, 2019, 2022)。CEOS/WGCV 在 2014 年正式启动了全球自主辐射定标场网 (RadCalNet) 计划。RadCalNet 制定了入网标准, 通过优选全球差异化地理分布的典型定标场, 形成网络化的地面和大气参数自动化、可溯源获取能力, 进而构建具备全球统一质量标准的定标数据处理中心 (<https://www.radcalnet.org/> [2022-03-18])。美国 Railroad Valley Playa 定标场、法国 La Crau 定标场、欧空局 ESA (European Space Agency) Gobabeb 定标场和中国国家高分辨遥感综合定标场 (简称“包头场”) 成为首批 4 个 RadCalNet 示范场。经过 ESA 牵头组织的两轮用户对比测试, RadCalNet 已进入业务化运行, 并在 RadCalNet 数据中心网站提供 30 min 一次、10 nm 光谱分辨率的大气层顶 (TOA) 反射率产品, 在提升外场辐射定标精度的同时可极大改善定标频次与一致性 (Bouvet 等, 2019)。

基于伪不变定标场 PICS (Pseudo-Invariant Calibration Sites) 的辐射定标是另一种无需人工测量的光学遥感载荷在轨辐射定标方法。其基于地

表和大气特性常年稳定的 PICS, 利用高精度遥感载荷 (如 MODIS) 的时间序列数据, 拟合观测值与观测几何、观测时间之间的变化关系, 构建出半经验的遥感载荷入瞳处辐亮度或反射率预测模型, 然后利用模型计算值与待定标卫星观测获得的表观辐亮度或表观反射率值进行对比分析, 进而实现光学遥感载荷辐射定标 (Helder 等, 2013)。PICS 选场在空间、光谱、角度效应以及地表/大气的稳定性方面有着严格要求 (Lacherade 等, 2013)。CEOS/WGCV 经过对多个 LNES 场地近 10 年的大量数据分析, 确定了 6 个 PICS, 分别是 Algeria3、Algeria5、Libya1、Libya4、Mauritania1、Mauritania2。这些 PICS 均分布在非洲沙漠地区, 具有反射率高、气溶胶浓度低、无植被覆盖的特点, 场地的辐射稳定性在 VNIR 谱段约为 2%, 在 SWIR 谱段约为 2%—3% (Helder 等, 2010)。国内也开展了中国本土区域的稳定目标筛选和目标特性测量, 确定了一批辐射特性相对稳定的地面目标 (Hu 等, 2020)。PICS 定标方法已应用于 Landsat、SPOT、POLDER、IKONOS、Envisat、MetOp、NOAA、ALOS 等多颗卫星的反射谱段光学遥感载荷辐射定标验证和辐射特性稳定性分析。例如, Helder 等 (2013) 利用 Terra/MODIS 和 EO-1/Hyperion 的观测数据基于 Libya4 构建了 Landsat 7/ETM+ 的大气层顶 (TOA) 反射率预测模型, 所得预测值与 ETM+ 观测获得的 TOA 反射率值之间的差异在 VNIR 谱段为 3%, 在 SWIR 谱段小于 6%。Chander 等 (2010) 利用上述 6 个 PICS 的 ETM+ (1999 年—2008 年) 和 MODIS (2000 年—2008 年) 时间序列数据分析了这两个载荷的辐射定标稳定性, 得到两者在 PICS 上的 TOA 反射率变化每年不超过 0.4%。

对于红外发射谱段的场地定标而言, Slater 等 (1996) 在 EOS 定标计划中提到两大类方法, 一是基于温度的定标方法 (温度基法), 二是基于辐亮度的定标方法 (辐亮度基法)。其中, 基于温度的定标方法是在载荷对目标成像时刻, 利用热辐射计测量目标表面的出射辐亮度或温度, 同时测量目标比辐射率、大气下行辐射以及目标—载荷辐射传输路径上大气温湿度廓线等参数, 利用大气辐射传输模型模拟得到载荷表观辐亮度, 并结合载荷获取红外图像上的目标平均 DN 值, 计算得到载荷相应通道的绝对辐射定标系数。基于辐亮度

的定标方法与太阳反射谱段的辐亮度基法类似。

由于水体具有热容大、表面均一、比辐射率接近于 1 等特点, 红外载荷定标大多选择大面积水体作为参考目标, 例如美国太浩湖 (Lake Tahoe)、索尔顿海 (Salton Sea)、伊利湖 (Lake Erie) 和安大略湖 (Lake Ontario) 等, 通过在水体中放置各种类型的浮标测温设备可测量水体表面温度或水体温度。NASA 喷气推进实验室 JPL (Jet Propulsion Laboratory) 自 1999 年以来在太浩湖布设了 4 套锚系无人值守的永久浮标系统, 搭载水体表面温度测量辐射计、风速风向测量装置、水体温度测量装置等, 已用于 Terra/MODIS、Terra/ASTER、Landsat 7/ETM+、Landsat 8/TIRS 等热红外遥感载荷的常态化场地定标 (Barsi 等, 2014; Padula 和 Schott, 2010)。此外, 陆地定标场也可用来作为红外载荷定标的高温地面参考目标。Tonooka 等 (2005) 利用太浩湖、索尔顿海、Railroad Valley Playa 定标场等 6 个水体和陆地场采用基于温度的定标方法和基于辐亮度的定标方法对 Terra/ASTER 进行了场地定标, 结果表明 Terra/ASTER 热红外波段的星上模拟值和观测值的平均差异为 0.4 K。中国学者多次利用青海湖、南海水面对中国 HJ-1B、FY-1C、FY-2B/2C 等卫星的热红外载荷进行场地定标 (韩启金 等, 2010; 刘李 等, 2012, 2014; 胡秀清 等, 2001, 2002)。中国资源卫星应用中心自 2018 年开始在青海湖部署了锚系无人值守的永久浮标系统, 以常态化测量水表温度, 同时还架设了地基微波辐射计、地基激光雷达实时获取青海湖大气温湿度廓线以及气溶胶光学特性。然而, 由于目标红外辐射瞬态变化快、外场测量易受环境影响等特点, 红外载荷定标不确定度一般徘徊于 1—2 K (戎志国 等, 2002; 韩启金 等, 2010; 刘李 等, 2012)。

鉴于红外场地定标需要开展地表温度和大气廓线测量, 投入成本高且单次测量不确定度较大, 部分研究者也尝试借助再分析资料, 结合辐射传输模拟的方式实现红外载荷辐射定标。例如, Gube 等 (1996) 利用 NCEP 提供的海表温度数据和 ECMWF 提供的大气剖面数据, 对 Meteosat 卫星红外波段进行定标, 解决了缺少星上黑体条件下业务化定标的难题, 得出的定标不确定度为 ± 1 K; Schott 等 (2012) 综合采用了飞机过境测量、海表面动力学温度测量、辐射计测量、水下浮标测量

等获取的水体表面温度或离水辐亮度数据, 结合 NCEP 再分析资料, 对 Landsat 系列卫星近 30 年的红外数据进行再定标与校准, 不确定度优于 0.6 K。童进军等 (2005) 利用青海湖水文自动观测浮标系统测得的水表温度、NCEP 再分析资料的探空廓线对 HY-1/COCTS 热红外通道进行了定标, 与在青海湖的同步试验结果进行比较, 两者的结果一致。该方法也被用于 FY-2B 热红外通道的绝对辐

射定标 (Tong 等, 2004)。

表 3 总结了主要的场地定标方法的特点。对于拥有高性能星上定标设备的光学遥感载荷, 场地定标可以作为星上定标的辅助校验手段; 星上定标不适用时, 场地定标则成为基本的定标手段。场地定标对地面场地的高要求促成了全球辐射定标场/测试场的建设。

表 3 场地定标方法对比
Table 3 Comparison of vicarious calibration methods

谱段	方法	预期不确定度	应用案例	优缺点
太阳 反射 谱段	反射率基法	5%—7%	SPOT/HRV, Terra/MODIS, Terra/ASTER, GOES-5/-6/VISSR, NOAA-7/AVHRR, Landsat/GF/ZY/FY 系列	优点: 需获取准同步的地表反射率和大气参数, 投入的测试设备和获取的测量数据相对较少, 是目前场地定标主流的方法 缺点: 需要对大气气溶胶光学参量做假设
	辐照度基法	3.5%	Landsat 5/TM, SPOT/HRV, Terra/MODIS, FY-1C/MVISR, CBERS/CCD	优点: 利用漫射与总辐射比描述大气气溶胶的散射特性, 减少了反射率基法中对气溶胶光学参量假设带来的误差 缺点: 数据测量相对较多, 且由于漫射/总辐射比的测量在高纬度地区会产生较大误差, 给辐射传输模拟将带来一定不确定性
	辐亮度基法	2.8%	NOAA-11/AVHRR, Landsat 4/TM	优点: 所需订正的残余大气较少, 受气溶胶的影响较小 缺点: 定标精度依赖于搭载在飞机上的辐射计, 而且由于需要飞机的辅助实施, 定标所需费用高, 实施难度较大, 实际应用相对受限
	基于伪不变定标场的方法	5%	Terra/MODIS, Landsat 8/OLI, FY-3C/MERSI, GF-1/WFV	优点: 以其历史观测数据构建伪不变场地表、大气特性模型 (如 TOA 反射率模型), 进而代替现场实测数据实现卫星载荷的外场定标, 具有人力、物力成本低等优点 缺点: 模型仅适用于特定大气、地表约束条件下, 因此当前主要用于卫星载荷辐射性能变化监测
红外 发射 谱段	温度基法	1—2 K	Terra/ASTER, Terra/MODIS, Landsat 8/TIRS, HJ-1B, FY-1C	优点: 对于星上黑体正常工作的国内外载荷, 可作为辐亮度或者温度产品验证的主要手段; 对于缺少星上黑体的载荷, 可作为主要定标手段 缺点: 测量参数较多, 且由于目标红外辐射瞬态变化快、外场测量易受环境影响等特点, 地表比辐射率和温度测量不确定度较大
	辐亮度基法		Terra/ASTER	优点: 相对温度基法所需订正的大气信息较少, 无需地表比辐射率信息 缺点: 定标精度依赖于搭载在飞机上的辐射计, 而且由于需要飞机的辅助实施, 定标所需费用高, 实施难度较大, 实际应用相对受限
	基于再分析资料的方法	0.6 K	Meteosat, Landsat 系列, HY-1/COCTS, FY-2B	优点: 主要利用水体或海表作为参考目标, 利用 NCEP、ECMWF 提供的大气廓线, 借助海洋浮标等测量数据, 推演卫星载荷观测辐亮度, 降低了获取大量定标样本的工作量, 适于长期监测红外载荷性能变化 缺点: 定标动态范围有限, 单次定标不确定度大, 需借助大量定标样本提高监测精度

3.3 交叉定标

交叉定标的基本思路是让辐射定标准确度高的卫星载荷与待定标卫星载荷观测同一目标区域, 将二者的测量值进行比对以实现待定标卫星载荷

的辐射定标 (Chander 等, 2013a)。多年来国内外大量学者以 MODIS、AIRS、IASI 等作为参考载荷, 对其他对地观测载荷以及大气探测载荷进行了大量的交叉比较研究, 发展了同步星下点过境 SNO

(Simultaneous Nadir Overpasses) (Cao 等, 2008)、统计交叉定标 (Shi 和 Bates, 2011)、稳定目标 (Helder 等, 2008) 以及要素转换 (Liu 等, 2004) 等多种方法。2005 年, WMO 和 CGMS 建立了全球星载交叉定标系统 GSICS (Global Space-based Inter-Calibration System) (Goldberg 等, 2011), 旨在利用交叉定标手段实现气象卫星载荷在轨辐射性能评价跟踪以及辐射定标系数计算等 (<http://gsics.nsmc.org.cn/>[2022-03-18])。

根据开普勒第三定律: 卫星的高度越高, 其轨道周期越长。随着时间的推移, 不同轨道高度的卫星会在特定地点相遇, 形成轨道交叉点。Cao 等 (2004) 分析 705 km 轨道高度的 Aqua 卫星与 850 km 轨道高度的 NOAA-16 卫星的交叉机会, 计算表明二者每 2—3 天在 $\pm 80^\circ$ 左右的极地区域可实现同步观测, 由此引出了基于 SNO 的交叉定标方法。Heidinger 等 (2002) 利用 Terra/MODIS 和 NOAA-16/AVHRR 的 SNO 观测数据进行交叉定标, 定标后的 NOAA-16/AVHRR TOA 反射率与 NOAA-9/AVHRR TOA 反射率之间的相对误差在 5% 以内。Cao 等 (2008) 分析表明, 对于 AVHRR 与 MODIS 具有相似光谱响应函数的波段 (例如 $0.63 \mu\text{m}$ 波段), 在 30 s 的时间差异约束下, 交叉定标不确定度可以控制在 1% 以内。在国内, Xu 等 (2014) 以 Aqua/MODIS 为参考载荷, 对 FY-3C 上搭载的 MERSI 和 VIRR (Visible and Infrared Radiometer) 载荷可见光通道开展了基于 SNO 的交叉定标, 还利用 GOME-2 的 TOA 反射率光谱数据调整 MODIS 和 MERSI 及 VIRR 的光谱差异, 结果表明交叉定标后的 MERSI 和 VIRR 的 TOA 反射率与 MODIS 相应通道的 TOA 反射率相对差异在 2% 以内。

基于 SNO 的交叉定标要求严格的观测时间、角度匹配 (如观测时间差异 $< 5 \text{ min}$, 角度差异 $< 3^\circ$), 其算法不涉及角度、空间、时间方面的转换。对于粗分辨率、宽幅以及每日覆盖全球的气象卫星来说, 匹配机会不是特别困难, 尚可获得足够的 SNO 样本。不过, SNO 交叉点往往存在于南北极区域, 这些轨道交叉点对应的地表类型单一, 对于载荷辐射响应范围的代表性不足。为了使交叉点覆盖更多的地物类型和辐射响应能级, Cao 等 (2012) 通过放宽交叉点的时间、角度匹配约束条件, 发展了扩展的 SNO 方法 (SNO_x), 使得交叉点的空间范围扩大到中低纬度地区。在时间

差异限定为 10 min 的情况下, 评估了 NPP/VIIRS 与 Aqua/MODIS 载荷的辐射一致性, 消除光谱差异后 VIIRS 与 MODIS 在太阳反射波段的 TOA 反射率差异在 1.5% 以内。有些学者通过将时间差异放宽至 30 min, 在中低纬度获得更多的交叉点来实现卫星载荷的 SNO_x 交叉定标 (Uprety 等, 2013)。然而, 对于中高分辨率卫星载荷, 窄幅宽和小视场角限制了足够数量 SNO、SNO_x 交叉点的获取, 同时高空间分辨率下地面参考目标的非均匀性一般也会进一步加剧。继续放宽角度差异和时间差异约束虽然可以获得更多交叉匹配机会, 但随之而来的问题是两颗卫星对同一目标观测时的状态发生较大变化, 需综合考虑地面目标的各向异性及地气耦合瞬态变化效应, 校正参考卫星载荷与待定标卫星载荷之间的时间、角度、光谱差异, 使得二者具有相同的入瞳辐射参考基准。Liu 等 (2004) 利用敦煌场开展 Terra/MODIS 和 FY-1D/MVIRS 的交叉定标, 二者之间存在 1—2 h 的时间差异、 10° — 30° 的观测天顶角差异, 利用 6S 辐射传输模型和敦煌场 BRDF 模型, 并结合两个载荷的光谱响应函数, 实现了两个卫星载荷观测数据的一致性转换, 交叉定标的不确定度在 5% 左右。Gao 等 (2016) 基于敦煌场和格尔木场地开展了 GF-1/PMS 与 Landsat 8/OLI 和 Terra/MODIS 之间的交叉定标, 采用辐亮度调整因子和反射率调整因子 (MIAFs) 补偿 PMS 与参考载荷之间的时间差异 (13—50 min)、观测天顶角差异 (50°) 以及光谱响应差异, 使用 OLI 进行交叉定标的不确定度为 5%—7%。考虑到大气辐射传输模型 (例如 MODTRAN 的不确定度为 2%) 以及地表 BRDF 模型误差, 这种基于多要素转换的交叉定标的不确定度通常在 5% 左右 (Zhao 等, 2018)。

交叉定标中使用时间稳定性高、朗伯性好的地面参考目标 (例如 PICS) 有助于降低交叉定标中时空匹配差异、角度转换带来的不确定度。Chander 等 (2013b) 以 PICS 场地为参考目标, 开展了 EO-1/ALI 和 Landsat 7/ETM+、Terra/MODIS 之间的交叉定标, 定标后 ETM+ 的 TOA 反射率与 ALI 的 TOA 反射率之间的相对差异从 5% 减小到 4% 以内, 对于光谱响应函数差异更大的 MODIS, 其 TOA 反射率与 ALI 的 TOA 反射率之间的相对差异从 1%—16.2% 降低至 5% 以内。何兴伟等 (2020) 基于 6 个 PICS, 以 SeaStar/SeaWiFS (Sea-viewing

Wide Field-of-view Sensor) 为参考载荷, 对 FY-3C/MERSI 太阳反射波段开展交叉定标, 结果表明使用交叉定标系数计算的 MERSI 波段 1 和波段 2 的 TOA 反射率与基于官方定标系数计算的 TOA 反射率的比值在 0.95—1。Vermote 和 Saleous (2006) 以 Terra/MODIS 为参考载荷, 利用沙漠等稳定目标对 NOAA-16/AVHRR 开展交叉定标, 将其定标系数与基于海面 and DCC 计算的定标系数进行对比, 二者之间的差异在 1% 之内。Li 等 (2017) 利用 Algeria 的稳定目标, 以 Landsat-8/OLI 为参考载荷对 Sentinel-2A/MSI 进行交叉定标, 定标后 MSI 的 7 个可见—短波红外波段的 TOA 反射率与 OLI 的 TOA 反射率之间的相对差异减小到 1% 以内。此外, 伴随 RadCalNet 业务化运行, 提出了利用

RadCalNet 自动辐射定标场作为地面参考目标, 实现“参考载荷→RadCalNet TOA 反射率产品→待定标载荷”的辐射基准传递链路, 为时间、角度约束放宽下的交叉定标提供新的解决途径 (杨敏等, 2021)。以地球稳定目标、自动辐射定标场等为地面参考目标的交叉定标成为 SNO、SNOx 等传统交叉定标方法的有益补充, 特别是能为高分辨率卫星载荷在轨辐射定标提供有力保障。

表 4 总结了主要的交叉定标方法的特点。交叉定标实施成本低、频次高, 成为验证光学遥感载荷辐射定标系数的常用手段。交叉定标的准确度主要受参考卫星辐射性能的支配, 随着国际上“定标星”技术的发展, 交叉定标的应用效果未来将得到大幅提升。

表 4 交叉定标方法对比

Table 4 Comparison of cross-calibration methods

谱段	方法	预期不确定度	应用案例	优缺点
	SNO	1%—3%	Terra/MODIS, Aqua/MODIS, NOAA-10/AVHRR, Landsat 8/OLI, FY-3C/VIRR, FY-3C/MERSI	优点: SNO 交叉定标要求严格的观测时间、角度匹配, 不涉及角度、空间、时间转换, 定标精度高, 目前广泛应用于中低分辨率气象卫星载荷在轨定标, 全球星载交叉定标系统 GSICS 中使用 SNO 方法 缺点: 交叉点主要集中在南北极, 难以覆盖很宽的辐射响应范围
太阳反射谱段	基于固定参考场的交叉定标	2%—5%	Terra/MODIS, Aqua/MODIS, NOAA/AVHRR, Landsat 8/OLI, Sentinel-2A/MUX, GF-1/PMS, GF-6/WFV, FY-3C/VIRR, FY-3C/MERSI	优点: 选择辐射特性非常稳定的地面目标 (如伪不变场、典型定标场等), 稳定的地表、大气特性可降低时间、角度差异引起的交叉定标误差, 故能放宽一些匹配约束条件, 使得交叉点能够落到中低纬度区域; 国内外卫星通过该方法作为卫星载荷宽动态辐射性能评价与监测的主要方式, 国产陆地卫星将该方法作为常规人工场定标的补充方式 缺点: 除光谱差异校正外, 未涉及参考卫星与待定标卫星之间的要素转换, 约束放宽过大的情况下, 定标结果的不确定度过大
	基于多要素转换的交叉定标	5%	SPOT-5, GF-1/PMS, FY-3C/VIRR, GF-4/MUX	优点: 针对中高分辨率卫星, 通过放宽时间、角度约束能够提高交叉定标样本数量和频次, 并利用地表 BRDF 模型和辐射传输模型, 校正参考卫星与待定标卫星间的要素差异 缺点: 多要素匹配转换过程中不可避免会引入误差, 增大交叉定标不确定性。目前, 该方法受限于较高定标不确定度, 主要作为卫星载荷辐射性能评价的方式
红外发射谱段	SNO	0.1—0.2 K	Terra/MODIS, Aqua/MODIS, FY-3C/VIRR, FY-3C/MERSI, NPP/VIIRS	优点: 要求严格的观测时间、角度匹配, 能保证红外发射谱段载荷交叉定标精度。目前 GSICS 中使用该方法, 并被广泛应用于中低分辨率气象卫星载荷在轨定标, 能够实现较高的定标精度和定标稳定性 缺点: 交叉点主要集中在南北极, 地物类型和亮温范围有限, 难以充分覆盖载荷辐射响应范围
	扩展 SNO	0.3—0.6 K	NOAA/AVHRR, Terra/MODIS, Aqua/MODIS, Landsat 8/TIRS, FY-3C/MERSI	优点: 通过放宽 SNO 匹配约束条件, 使得交叉点能够更多地落到中低纬度地区, 增加了定标样本数量和频次, 是 SNO 方法的有益补充, 对卫星载荷长时序、宽动态辐射性能监测具有重要意义 缺点: 约束放宽将引入误差, 降低交叉定标结果的稳定性和准确性

3.4 月球定标及其他

月球作为长期稳定存在的自然天体, 没有大气和液体的流动侵蚀, 其表面稳定性非常高, 每

年的变化低于亿分之一 (Kieffer, 1997)。将其用作定标源可避免大气以及表面环境状态变化的干扰。21 世纪初, 国际上出现了新的卫星在轨定标

手段——月球定标, 主要用于太阳反射谱段载荷辐射定标。该方法通过调整遥感载荷姿态对月球进行成像, 并利用月球反射的太阳能量信息来实现载荷的辐射定标和辐射稳定性监视。OrbView-2/SeaWiFS、Terra/MODIS、Aqua/MODIS、NPP/VIIRS等遥感载荷都具备对月球成像的能力, 可进行长期、系统的太阳反射谱段月球定标。

月球辐射特性的精准获取是决定月球定标效果的重要因素。有别于地面参考目标, 月球辐射特性无法直接测量获取, 国际上一般利用地基或天基对月观测数据构建月球辐射模型。美国地质调查局利用地基自动月球观测台(ROLO)在1997年—2003年期间进行了地基月球观测, 获得了构建月球辐射模型必需的观测数据(<http://www.moon-cal.org>[2022-03-18])。Stone和Kieffer(2004)综合考虑月相、天平动变化、地形分布和反冲效应4个因素, 提出了月球圆盘等效反照率的解析表达式, 即ROLO模型, 并用地基对月观测数据对解析模型进行3次拟合, 得出模型的最终表达式, 拟合残差约为1%, 模型不确定度约为5%—10%。然而ROLO模型仅对32个波段进行了建模, 在波段覆盖范围上有所不足。全球星载交叉定标系统(GSICS)和CEOS/WGCV的IVOS专业组联合成立了月球定标子工作组, 旨在通过成员间共享月球影像数据GLOD(GSICS Lunar Observation Dataset), 在ROLO模型的基础上, 构建更精准的月球辐照度模型GIRO(GSICS Implementation of the ROLO model)。另外, 针对NPP/VIIRS昼夜波段(Day/Night Band)夜间遥感的应用, Miller和Turner(2009)利用数十年的地基对月观测数据以及绕月卫星测量的反射率数据, 拟合得到月球圆盘等效反照率随月相变化规律, 构建了MT2009高光谱模型, 其波段范围为0.20—2.80 μm , 模型不确定度约为7%—15%。不过MT2009模型只考虑了月相角对辐照度的影响, 没有考虑月表地形起伏、天平动、反冲效应的影响, 导致其模型精度不高, 在月相角小于 5° 时尤甚。

受限于当前月球辐射模型精度, 月球定标手段主要用于卫星载荷辐射稳定性监测及开展不同载荷间的交叉验证。例如, NASA利用NPP/VIIRS的对月观测数据与ROLO模型模拟的月表辐照度进行比对, 以监视VIIRS载荷的在轨性能变化, 并将月球定标结果同天上漫射板定标结果进行比较, 结

果表明两种方法的一致性优于2%。Twedt(2021)利用月球为参照, 分析得出NOAA-20/VIIRS在2018年—2020年期间M1波段衰退了至少1.5%。Xiong等(2010)利用MODIS近8年的对月观测数据计算出月表辐照度, 并利用ROLO模型对观测辐照度数据进行归一化以实现MODIS辐射特性的稳定性监测。Eplee等(2011)基于月球观测数据开展了SeaWiFS和MODIS的交叉对比, 结果表明两者的辐射测量一致性在3%—8%的水平。Xiong等(2008)以月球为观测目标, 利用ROLO模型对Terra/MODIS和Aqua/MODIS进行了对比分析, 结果显示二者相对差异在1%—3%。Urabe等(2019)利用GIRO模型对SGLI、MODIS和VIIRS进行了对比, 结果表明三者相对差异在1%以内。

此外, 除了太阳和月球, 太空中部分恒星也具有极好的辐射稳定性, 可作为长期稳定的辐射基准。作为真正的点源, 恒星用于在轨定标已有40余年历史。研究表明对恒星光谱能量分布的辐射标定在可见光—近红外谱段的不确定度优于1%, 红外谱段(约2—14 μm)优于5%; 光谱标定的不确定度在可见光谱段 $<1\%$, 红外谱段约为1%(Russel等, 2007)。由于大多数对地观测载荷的视场、信噪比无法满足恒星观测要求, 且用于计算恒星辐射值的观测数据大多集中于天文观测的相关谱段, 恒星定标方式目前主要在天文卫星和相关的天文观测中使用, 只有极少数高分辨遥感载荷(例如IKONOS、Pleiades)开展了恒星定标相关的研究。Bowen(2002)利用Gunn & Stryker恒星光谱数据集筛选出了11颗恒星用于IKONOS载荷在轨辐射定标和长期稳定性监测。Fourest等(2012)尝试利用恒星对Pleiades进行辐射定标, 结果表明在波段B0和B1恒星定标和场地定标所得增益系数相对差异小于2%, 而在B2和B3波段相对差异则大于10%。

4 空间辐射基准传递定标前沿技术

为了解决高精度在轨定标的辐射基准问题, 本世纪初, 欧美先后提出将可溯源至SI的辐射基准源引入卫星, 称之为可溯源卫星SITSat(SI-Traceable Satellites)(俗称“定标星”)。以欧空局的“TRUTHS”和美国的“CLARREO”计划为例, 拟通过同时观测地球稳定目标或者月球, 将高精度空间辐射测量基准从可溯源卫星传递至其他

卫星上, 以大幅提升光学遥感卫星辐射定标整体水平、保证数据质量一致性。“十二五”以来, 中国也通过国家 863 计划和重点研发计划项目先后部署了空间辐射测量基准源、基准载荷和相关基准传递关键技术攻关工作(卢乃锰等, 2020)。虽然各国“空间辐射基准系统”中的空间辐射基准仍处于探索阶段, 但是这种为其他载荷提供统一且可溯源至 SI 标准参考源的定标方法, 将大大提升光学载荷在轨辐射定标精度、保证多源卫星数据质量长期的高一致性与高稳定性, 必将成为未来在轨定标技术发展的重要趋势。

4.1 可溯源至 SI 的空间辐射基准

21 世纪初, NPL 联合 UK Space Agency 提出欧洲 TRUTHS 定标星建议(Fox 等, 2002), 多年来持续开展了可溯源至 SI 的初级基准(CSAR)、星上定标系统以及高光谱成像系统等的设计和技术攻关。TRUTHS 计划包括如下几个遥感载荷(Fox 和 Green, 2020): (1) 低温太阳绝对辐射计 CSAR (Cryogenic Solar Absolute Radiometer), 这是 TRUTHS 计划中最为关键的载荷。CSAR 采用与实验室中所使用的低温初级基准源相同的技术, 在低于 30 K 的环境下不确定度可优于 0.01%, 实际运行过程中有可能维持在相对较高温度的环境中 (<60 K)。目前 TRUTHS 已开展了第二代 CSAR (CSAR_v2) 的设计研制工作。(2) 高光谱成像光谱仪 HIS (Hyperspectral Imaging Spectrometer), 这是 TRUTHS 计划中实现对地、对月以及对日观测的主要载荷。光谱范围覆盖 320—2450 nm, 光谱分辨率在 1000 nm 以下为 4 nm, 1000 nm 以上为 8 nm, 空间分辨率为 50—100 m (取决于探测器和信噪比), 总幅宽 100 km, 信噪比大于 150; (3) 在轨定标系统 OBCS (On-Board Calibration System) 用于实现星上的基准传递, 主要包括一个传递辐射计 TR (Transfer Radiometer)、8—10 个低功率激光二极管 LDs (Low Power Laser Diodes), 一个积分球 IS (Integrating Sphere) 以及一个带有两个扩散器 (diffusers) 的扩散器轮。

TRUTHS 的空间辐射基准传递过程可分为如下几个步骤: (1) 利用 LDs 实现 TR 向 CSAR 的溯源。这一步要求 LDs 的光谱是已知的, 并且整个过程也需要针对每个不同波长的 LDs 分别进行。(2) 在 LDs 的波长上, 利用 TR 对 HIS 进行定标。(3) 使

用标准灯实现 HIS 所有波长上的定标。由于特定光谱位置上的绝对辐射响应已经由第 (2) 步标定, 此步骤主要利用标准灯光谱的平滑性对其他波长进行定标。TRUTHS 最终预计实现太阳光谱辐照度 0.3%, 太阳总辐照度 0.02%, 对地观测光谱反射率 0.3% 的准确度 (Fox 和 Green, 2020)。2019 年 5 月, 欧空局将 TRUTHS 定标星任务列入地球观测计划 (ESA Earth WATCH mission) 中, 预计将于 2026 年—2028 年上天 (Fox 等, 2021)。

2008 年—2010 年, NASA、科罗拉多大学和威斯康星大学等推动美国“CLARREO”计划启动, 希望其能够成为环绕地球的“计量实验室”, 为探测气候变化提供 SI 溯源参考 (Roithmayr 等, 2014), 并逐步开展计划论证、详细设计以及太阳反射 (RS) 谱段、红外 (IR) 谱段基准载荷研制。CLARREO 计划设计的载荷中包括太阳反射光谱仪 (Reflected Solar Spectrometer)、红外傅里叶变换光谱仪 (Infrared Spectrometer) 和全球导航卫星系统掩星接收机 (Global Navigation Satellite System-Radio Occultation)。红外傅里叶变换光谱仪为地球表面发射辐射的测量提供了一个基准, 光谱范围 200—2000 cm^{-1} (目标是到 2760 cm^{-1}), 光谱分辨率 0.5 cm^{-1} , 星下点视场不小于 25 km。该红外光谱仪可溯源至星上搭载的黑体, 黑体的温度由 3 种物质的相位变化单元标定, 黑体的发射率由定标激光和一个热挡板来获得, 该红外光谱仪测量的系统不确定度小于 0.1 K。太阳反射光谱仪提供 320—2300 nm 范围的地球反射太阳辐射的测量基准, 光谱分辨率 8 nm, 光谱采样间隔 ≤ 4 nm, 仪器的扫描幅宽大于 100 km, 采样间隔 0.5 km, 信噪比大于 33 (380—900 nm) 和 20 (其他波长)。太阳反射光谱仪的极化敏感性在 1000 nm 以内小于 0.75% 和 0.25%, 辐射定标准确度优于 0.3% (反射率)。太阳反射光谱仪能够直接瞄向月球和太阳进行定标, 也能够瞄向其他对地观测载荷的视场以获取相匹配的同步观测。掩星接收机用于大气探测, 其对 5—20 km 高度内大气的探测准确度可达 0.06% (Wielicki 等, 2013)。

2013 年—2014 年, NASA 利用高空气球开展了两次升空高度 39 km 的飞行试验, 搭载 CLARREO 太阳反射光谱仪的原理样机—气候科学高光谱成像仪 HySICS (HyperSpectral Imager for Climate Science), 验证了其工程性能 (Kopp 等,

2017)。2016年，NASA设立了CLARREO探索计划“CPF (CLARREO Pathfinder)”，希望利用小卫星作为平台搭载HySICS，实现辐射基准载荷反射谱段测量不确定度 $<0.3\%$ 。CPF的轨道高度设计为609 km，轨道倾角设计为 90° ，这样的轨道设计能够满足CPF计划对于全球和局地尺度、以及季节和年际变化监测的需求。2019年，CPF项目通过初步设计审查(PDR)，预计搭载于国际空间站(ISS)运行，计划于2023年底发射([https://clarreo-pathfinder.larc.nasa.gov/mission-overview/\[2021-11-10\]](https://clarreo-pathfinder.larc.nasa.gov/mission-overview/[2021-11-10]))。

4.2 空间辐射基准传递定标

作为星上定标新理念的“空间辐射基准”虽有望实现跨越式的定标精度提升，然而，可溯源至SI的辐射基准尚处在探索阶段，其费用就目前而言也将远高于传统的星上定标系统，并不适宜在每颗业务卫星上都搭载空间辐射基准载荷。因而，在欧美提出的“定标星”计划中，是以可溯源至SI的“空间辐射基准”作为参考，让其他卫星载荷与“定标星”上的空间辐射基准载荷观测相同目标场景，将高精度的辐射基准从“定标星”传递至其他卫星载荷，从而实现“空间辐射基准传递定标”。虽然定标星暂时并未上天，但由于空间辐射基准传递定标的核心在于星—星观测要素交叉匹配，其应用理念可以找出很多原型，如SNO、统计交叉定标、基于大气辐射传输法以及光线追踪法等多种交叉定标算法，以及WMO和CGMS构建的全球星载交叉定标系统(GSICS)(Chander等, 2013a)。分析表明，在严格的SNO匹配约束下，大幅宽、高重访的卫星太阳反射谱段交叉定标不确定度能够控制在1%以内(Cao等, 2008)，但是一方面这种严格SNO匹配约束下的交叉点多分布于高纬地区，难以代表载荷全动态响应，另一方面对于幅宽和重访周期受限的高分辨率陆地观测卫星载荷，往往难以获得足够的交叉匹配机会。而在放宽时空谱角匹配约束的条件下，由于基准载荷与待定标载荷之间在观测几何、探测谱段、时空同步等方面的差异，导致地面参考目标特性及大气环境变化等带来的不确定性可能会淹没“定标星”高精度辐射基准所作的努力。

可以说，作为将待定标载荷与空间辐射基准进行关联的必经途径，空间辐射基准传递定标成

为发挥未来“定标星”应用效益的关键。欧美在“定标星”的设计中均把空间辐射基准传递作为重要环节。如TRUTHS计划除定标星本身支持长期气候变化科学研究目标外，还特别强调通过交叉定标的方式实现空间辐射基准传递，在地面基础设施的支撑下使得全球光学卫星定标精度实现跨越式提升(Fox和Green, 2020)。CLARREO CPF则提出将实现两个任务目标：其一，实现350—2300 nm上的反射率星上可溯源定标，定标精度比现有载荷高5—10倍(Kopp等, 2017)；其二，作为在轨参考光谱仪，对其他卫星太阳反射波段进行交叉定标(Lukashin等, 2013)，列入CPF空间辐射基准传递定标应用计划的卫星载荷有CERES、VIIRS。

空间辐射基准传递定标的核心在于基准卫星和待定标卫星观测相同的目标场景，因此需综合考虑卫星轨道差异、载荷特性差异及可匹配的目标场景特性。Fox等(2021)分析了利用交叉定标方法实现CLARREO CPF和TRUTHS空间辐射基准高精度传递的需求：在轨道设计方面，采用不同于通常陆地、海洋、气象等业务卫星高度的轨道，将更容易在较为严格的时间角度约束(例如 ± 5 min)下，获得分布于全球高、中、低纬不同位置的SNO交叉点；在空间基准载荷设计方面，需要具备相对较高的光谱分辨率与空间分辨率，以TRUTHS为例，基准载荷在350—2300 nm范围内连续采样且光谱分辨率小于4—8 nm，同时空间分辨率达到500 m，一方面是为了降低光谱匹配差异，另一方面足以匹配面向气候应用的粗分辨率载荷，而对于高分辨率载荷，也可通过被定标载荷观测像元聚合的方式实现空间匹配；在传递所借助的地面参考目标方面，PICS场地特性减小了季节性和朗伯性的影响，是辐射基准传递过程中理想的参考场地，而月球因为没有大气影响，也可作为传递的中间场景。TRUTHS和CLARREO CPF虽分别由ESA和NASA主导，但各自在系统设计中均体现了上述考虑。

TRUTHS计划使用的传递定标参考场景包括RadCalNet定标场、PICS场、月球、海上浮标、深对流云/Rayleigh/Sunlint等自然景观，借助这些参考场景将其可溯源至SI的空间辐射基准传递到其他遥感载荷(Lukashin等, 2013)。Javier等(2017)以TRUTHS为基准载荷分析PICS、La Crau等参考

场，通过分别估算光谱、空间、时间差异带来的不确定度，得到30 min时间差异带来的不确定度

约0.2%—0.4%，以Sentinel-2为待定标载荷可实现0.4%—0.7%的定标不确定度。

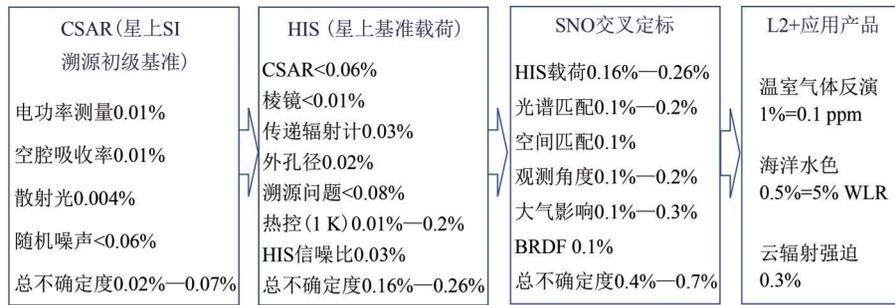


图4 TRUTHS的空间辐射基准不确定度传递(Fox和Green, 2020)

Fig. 4 Uncertainty transfer chain of radiometric benchmark for TRUTHS (Fox and Green, 2020)

CLARREO也在其CPF计划中提出空间辐射基准传递定标不确定度优于0.3%的目标。为了比常规SNOs交叉定标提供更多的空间、时间、光谱波段和角度匹配结果，从而改进交叉定标效果，CPF把轨道建模及交叉定标事件预测作为关键环节。Wielicki等(2008)通过研究交叉定标中存在的8个维度挑战(时间、纬度、经度、高度、SZA、VAA、VZA等)，采用轨道模拟方法设计出3个倾角为90°的CLARREO轨道专门用于交叉定标。针对月球定标中绝对辐射测量基准不够准确的问题，CLARREO计划提出了利用CPF在轨运行期间对月球的长期观测，10倍提升现有ROLO模型的准确度。除了在10 min内对CERES、VIIRS以及月球光谱反射率进行近地轨道(LEO)交叉定标测量，CPF还将对至少一个地球同步轨道(GEO)上的遥感载荷进行交叉定标测量(在7.5 min内)，并将对通常用于场地定标的陆表场地(例如Libya4)进行星下点测量，这些数据将提供给科学界进行进一步的数据分析(<https://clarreo-pathfinder.larc.nasa.gov/inter-calibration/>[2021-11-10])。Roithmayr等(2014)的研究表明如果CLARREO在609 km、90°倾角的极轨轨道上运行，可为JPSS平台上的CERES和VIIRS载荷提供足够的交叉定标机会，且数据匹配误差对交叉定标的不确定度贡献将在0.3%以内。

中国在“十三五”国家重点研发计划中部署了“空间辐射基准传递定标及地基验证技术”项目，考虑不同陆地、气象、海洋卫星载荷由于自身观测特性导致的星—星观测匹配条件差异，针对性地开展多途径辐射基准传递及测试基准一致

性溯源关键技术攻关，发展空间辐射基准传递定标方法，研制国产卫星空间辐射测量基准传递定标数据处理与溯源分析系统。其方法体系架构见图5。

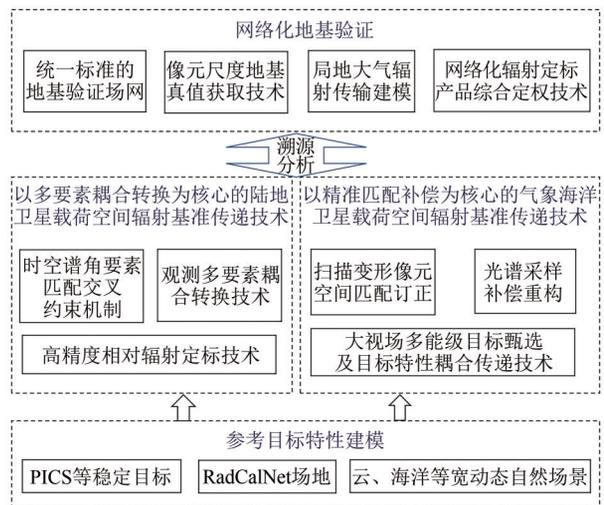


图5 中国空间辐射基准传递定标方法架构

Fig. 5 Structure of approaches for China radiometric benchmark transfer calibration

对于中高分辨率陆地观测卫星，考虑到幅宽窄、重访周期长的特点，在传递定标时需放宽基准卫星与待定标卫星之间的时空谱角要素匹配约束来获取足够的轨道交叉观测数据，在此过程中，观测目标的各向异性和地气耦合瞬态变化效应使得空间辐射基准难以准确传递至待定标卫星载荷。因此，提出以多要素耦合转换为核心的陆地卫星载荷空间辐射基准传递技术，充分考虑不同卫星之间的空间、光谱及角度等要素差异，分析空间辐射测量基准传递过程中的各项不确定性要素，

构建星—星地面观测时空谱角要素匹配约束机制；进而合理匹配具有广泛地理分布、差异性辐射特性和大气辐射传输类型的宽动态参考目标系统，构建突破尺度域限制的对地观测载荷多要素耦合转换方法。对于气象/海洋卫星，虽其大幅宽容易满足SNO匹配交叉条件，但集中于两极的SNO交叉点还是难以满足宽动态的载荷响应需求，同时，大视场也带来了边缘像元畸变大及光谱差异等影响。因此，为了进一步提升传递定标准确度，一方面需研究空间精匹配、光谱采样补偿重构等关键技术，解决大视场像元空间形变以及由于采样分辨率不足引入的传递误差，最大限度降低辐射基准传递链路的不确定度；另一方面，提出大视场多能级目标甄选以及目标特性耦合传递定标技术，通过增大定标样本的动态范围，增强定标结果的适用性及稳定性，以达到空间辐射基准传递定标反射谱段2%、发射谱段0.2 K的准确度。

为了验证空间辐射基准传递定标技术，“空间辐射基准传递定标及地基验证技术”项目利用包头场加入RadCalNet的契机，在中国集成构建具备国际统一质量标准的地基验证场网，研制地基反射/发射谱段目标特性自动测量设备，并通过标准辐射传递辐射计、外场设备环境适应性、局地大气辐射传输建模等技术创新，建立SI—外场—星上测量基准传递链路(Ma等, 2020)，在保证多试验场的测量基准一致性和产品质量可追溯的同时，进一步发展网络化辐射定标产品综合定权技术，降低单场地验证不确定性，提升地基验证精度。

在“空间辐射基准传递定标及地基验证技术”体系中包含天基、地基两条辐射基准传递链路：(1) 从作为“空间辐射基准载荷”的高精度卫星，借助对于宽动态参考目标场景的观测，将空间辐射测量基准传递至其他待定标卫星载荷，这条传递链路的主要目的是定标；(2) 借助地基观测设备对于地基验证场的特性测量，将辐射测量基准从实验室传递至外场，进而利用过境卫星的同步观测传递至待验证卫星载荷，这条传递链路的主要目的是验证。

4.3 临近空间辐射基准传递定标

将空间辐射基准载荷搭载于低轨卫星或空间站上，一方面仍具有较长的重访周期，导致难以全面提升与多系列卫星的交轨频次；另一方面其

匹配点分布于全球范围，缺乏局地地表和大气的先验知识，导致实际地物下垫面均匀性、地表BRF、大气环境扰动、时空匹配等仍会引入大量不确定度(Fox和Green, 2020)。高空科学气球能够飞行于40 km，甚至达到50 km高的临近空间。由于绝大部分大气质量和天气现象集中在气球飞行高度以下，在此高度获得的对地观测辐射与卫星观测辐射已基本一致。另外，由于高空科学气球能够实现区域长时驻留式飞行，因此可以将其看作是一个准静止的观测平台。将空间辐射基准载荷搭载于高空科学气球平台，针对特定区域目标开展观测，进而实现辐射基准的传递也是一种可行的方案。

NASA于2013年和2014年先后开展了两次利用高空科学气球搭载辐射基准载荷的原理验证试验(Kopp等, 2014, 2017)，两次高空气球试验的飞行高度均在39 km左右，每次试验持续时间约9 h。两次试验均搭载了CPF计划支持研制的HySICS载荷。HySICS的设计沿袭了CLARREO思路，通过对直接观测太阳光谱辐照度进行实时校准，使得载荷具有更佳的稳定性，设计所能达到的对地观测辐射不确定度为0.2%。

Kopp等(2017)基于试验数据进行了较为全面的不确定度分析工作，分析了包括成像仪焦平面校正中的坏像元、读数噪声、暗电流和热背景、线性度、像元相关的增益、平场校正，仪器光学系统带来的散粒噪声、衍射、光谱校正、亮度偏移、极化，以及由于消光系统带来的光学表面区域照明差异导致的孔径比、积分时间、滤镜透过率等多种因素带来的不确定度，并给出了最终的合成不确定度(对于不同亮度的地面场景，7.67%—9.43%@350—2300 nm; 1.88%—2.16%@450—1900 nm)(图6)。最大的不确定度贡献来源于：(1) 焦平面和光栅效率导致的平场校正和读数噪声影响；(2) 消光系统实验室定标中由于光源限制带来的影响；(3) 气球飞行过程中月球定标时较低的能量值。同时推断HySICS不确定度受太阳辐照度实时校准方法和过程的影响很小，在明亮场景下不确定度能达到0.3%的水平。

尽管NASA的HySICS高空科学气球试验主要目的是验证CLARREO原理样机及太阳辐照度校准方案，但试验的结果也为开展临近空间辐射基准传递定标带来了启示。中国在国家重点研发计划

项目“空间辐射基准传递定标及地基验证技术”的支持下,也探索并开展了基于高空科学气球平台的临近空间辐射基准传递定标试验。试验搭载了非成像的可见—短波红外辐亮度计作为辐射基准参考,最高飞行高度达到32 km。得益于试验过

程中有效的载荷工作状态控制,获得的对地观测数据具有较高的稳定性,为后续适合临近空间搭载的辐射基准载荷的设计研制,以及临近空间光学辐射基准系统的构建积累了宝贵的经验。

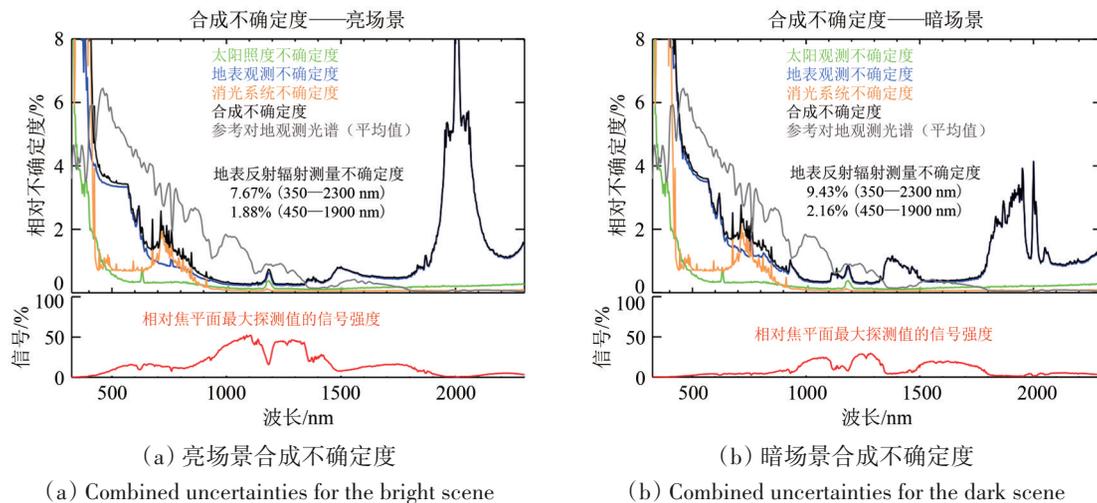


图6 HySICS试验不确定度分析(Kopp等,2017)

Fig. 6 Uncertainty of HySICS observation (Kopp et al., 2017)

5 结 语

时至今日,由于航天遥感载荷星上定标难以溯源,而以地面目标测量值为参照基准的场地定标受尺度效应、大气条件、环境变化等不确定因素影响较大,光学遥感载荷在轨定标的精准性和可靠性问题,仍属亟待解决的国际难题,尤其是在满足全球变化等热点问题的高精度度、高一致性定标需求上尚有较大欠缺。本文从光学遥感在轨辐射定标的精准性、一致性、可追溯性技术需求出发,回顾了星上定标、场地定标、交叉定标、月球定标等光学遥感卫星主要在轨辐射定标方法的发展历程及技术要点,介绍了当前国际前沿的空间辐射测量基准传递定标技术,其利用“定标星”搭载空间辐射基准载荷,通过与其他卫星载荷同时观测目标场景的方式,将高精度的空间辐射测量基准从天基标准辐射定标系统向光学遥感业务卫星传递,并准确核算传递路径中各环节的不确定度,保证不同遥感卫星数据产品的高质量、高一致性、可追溯性,有望开创全球统一质量标准的高精度度、高稳定性、高频次定标新局面。

21世纪欧、美、中均提出了各自的“定标星”

计划,作为将待定标载荷与定标星辐射测量基准进行关联的必经途径,空间辐射基准传递定标技术的突破成为发挥未来定标星“空间辐射基准载荷”应用效益的重要环节。由于不同卫星载荷观测要素转换涉及地面目标的各向异性及时空耦合转换、辐射测量基准溯源、地气耦合瞬态变化效应等诸多科学问题,发展空间辐射基准传递定标技术面临以下挑战:

(1) 高精度的在轨辐射基准传递方法。在假设卫星时空谱角观测要素完全一致的情况下,辐射测量量值可直接由基准载荷传递给待定标载荷。然而,实际情况下两颗卫星载荷的观测要素很难完全一致,由此对于不同特点的卫星载荷会遇到不同问题:对于陆地观测卫星,一般重访周期长、幅宽窄,因而轨道交叉机率小,且观测目标空间异质性与各向异性特征显著,辐射基准传递就需要在放松观测要素匹配约束的情况下,进行目标特性时/空/谱/角多要素耦合转换;对于气象/海洋卫星,虽然不存在轨道交叉困难的问题,但针对SNO交叉点多在两极,辐射能级覆盖不足,亦需联合深对流云、南极冰盖、高稳定沙漠、月球、平静海洋等多源自然稳定目标,发展在轨多

目标融合的宽动态综合传递定标,提升传递定标的适用性以及定标频次。

(2) 一致性的数据产品辐射质量追溯技术。卫星上天后,数据产品辐射质量需要通过地基验证的手段才能追溯到定标基准。这其中涉及两个方面的问题:一方面需要降低地基辐射基准传递链路中目标特性测量、大气辐射传输全链路各环节的不确定度,来提高地基真值准确度;另一方面,需要综合不同下垫面、不同环境的试验场,开展网络化地基验证,以降低单独使用一个场地的不确定性,提升总体验证精度。因此有必要引入国际前沿的网络化全球自主辐射定标理念,通过差异化分布下垫面、高频次地基自动测量、统一质量标准的多场地定标基准溯源与不确定度分析,来保证不同时间、不同卫星数据产品的质量一致性。

(3) 全系统的空间辐射基准传递定标验证技术。在定标星上天前,如何贯通空间辐射定标基准源、参考目标特性、传递模型方法等产生不确定度的环节,系统性验证空间辐射基准传递定标技术链路,这需要在尽量减小环境不确定性影响的前提下开展外场试验。考虑到大气层中的分子和粒子垂直分布密度均存在指数衰减的规律,在18 km高度以上影响大气辐射传输过程的大气成分和物理环境相对稳定,因此,在平流层高度开展试验是验证空间基准辐射传递定标技术体系的有效方式之一。然而,这对平台负载能力、机动控制能力、长时驻空能力等都提出了很高的要求,平流层特殊的空间物理环境也对载荷的环境适应能力提出了挑战。

参考文献(References)

- Abel P, Guenther B, Galimore R N and Cooper J W. 1993. Calibration results for *NOAA-II* AVHRR channels 1 and 2 from congruent path aircraft observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 10(4): 493-508 [DOI: 10.1175/1520-0426(1993)010<0493:CRFACA>2.0.CO;2]
- Anderson J G, Dykema J A, Goody R M, Hu H and Kirk-Davidoff D B. 2004. Absolute, spectrally-resolved, thermal radiance: a benchmark for climate monitoring from space. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 85(3/4): 367-383 [DOI: 10.1016/S0022-4073(03)00232-2]
- Barnes W L and Price J C. 1980. Calibration of a satellite infrared radiometer. *Applied Optics*, 19(13): 2153-2161 [DOI: 10.1364/AO.19.002153]
- Barsi J A, Markham B L, Czapla-Myers J S, Helder D L, Hook S J, Schott J R and Haque M O. 2016. Landsat-7 ETM+ radiometric calibration status//Proceedings of SPIE 9972, Earth Observing Systems XXI. San Diego: SPIE: 99720C [DOI: 10.1117/12.2238625]
- Barsi J A, Schott J R, Hook S J, Raqueno N G, Markham B L and Radocinski R G. 2014. Landsat-8 thermal infrared sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration. *Remote Sensing*, 6(11): 11607-11626 [DOI: 10.3390/rs6111607]
- Berthelot B and Santer R. 2009. Calibration test sites selection and characterisation: site equipment and auxiliary data[EB/OL]. [2021-11-10]. https://calvalportal.ceos.org/c/document_library/get_file?uuid=807d522f-b77d-413f-84de-69426b3e712c&groupId=10136
- Biggar S F, Dinguirard M C, Gellman D I, Henry P J, Jackson R D, Moran M S and Slater P N. 1991. Radiometric calibration of SPOT 2 HRV: a comparison of three methods//Proceedings of SPIE 1493, Calibration of Passive Remote Observing Optical and Microwave Instrumentation. Orlando: SPIE: 155-162 [DOI: 10.1117/12.46693]
- Biggar S F, Santer R P and Slater P N. 1990. Irradiance-based calibration of imaging sensors//10th Annual International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'90). College Park: IEEE: 507-510 [DOI: 10.1109/IGARSS.1990.688536]
- Biggar S F, Slater P N and Gellman D I. 1994. Uncertainties in the in-flight calibration of sensors with reference to measured ground sites in the 0.4-1.1 μm range. *Remote Sensing of Environment*, 48(2): 245-252 [DOI: 10.1016/0034-4257(94)90145-7]
- Bourg L and Delwart S. 2006. MERIS instrument calibration//2nd Working Meeting on MERIS and AATSR Calibration and Geophysical Validation (MAVT-2006). Frascati: ESA: 1-10
- 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]
- Bowen H S. 2002. Absolute Radiometric Calibration of the IKONOS Sensor Using Radiometrically Characterized Stellar Sources. In Proceedings of the PECORA 15, Land Satellite Information IV, ISPRS Commission I Symposium, Denver, CO, USA: ISPRS: 7-13
- Cao C Y, Uprety S and Blonski S. 2012. Establishing radiometric consistency among VIIRS, MODIS, and AVHRR using SNO and SNOx methods//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Munich: IEEE: 6928-6931 [DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6352569]
- Cao C Y, Weinreb M and Xu H. 2004. Predicting simultaneous nadir overpasses among polar-orbiting meteorological satellites for the intersatellite calibration of radiometers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21(4): 537-542 [DOI: 10.1175/1520-0426(2004)021<0537:PSNOAP>2.0.CO;2]
- Cao C Y, Xiong X X, Wu A S and Wu X Q. 2008. Assessing the consistency of AVHRR and MODIS L1B reflectance for generating fun-

- damental climate data records. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D9): D09114 [DOI: 10.1029/2007JD009363]
- Chander G, Hewison T J, Fox N, Wu X Q, Xiong X X and Blackwell W J. 2013a. Overview of intercalibration of satellite instruments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1056-1080 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2228654]
- Chander G and Markham B. 2003. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11): 2674-2677 [DOI: 10.1109/TGRS.2003.818464]
- Chander G, Mishra N, Helder D L, Aaron D B, Angal A, Choi T, Xiong X X and Doelling D R. 2013b. Applications of spectral band adjustment factors (SBAF) for cross-calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1267-1281 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2228007]
- Chander G, Xiong X 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 J and Xiong X X. 2011. Assessment of MODIS thermal emissive band on-orbit calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(6): 2415-2425 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2098881]
- Chen H L. 2003. Review on on-board calibration technology. *Infrared*, 24(6): 9-14 (陈海龙. 2003. 星上定标技术概述. *红外*, 24(6): 9-14) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2003.06.002]
- Chen W, Yan L, Li Z Q, Jing X, Duan Y N and Xiong X X. 2013. In-flight absolute calibration of an airborne wide-view multispectral imager using a reflectance-based method and its validation. *International Journal of Remote Sensing*, 34(6): 1995-2005 [DOI: 10.1080/01431161.2012.730160]
- China Association of Remote Sensing Application Group. 2021. *The Roadmap of Remote Sensing Discipline*. Beijing: Science and Technology of China Press (中国遥感应用协会组. 2021. 遥感学科路线图. 北京: 中国科学技术出版社)
- Czapla-Myers J S, Thome K J and Leisso N P. 2007. Calibration of AVHRR sensors using the reflectance-based method//*Proceedings of SPIE 6684, Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization III: Readiness for GEOSS*. San Diego: SPIE: 668407 [DOI: 10.1117/12.734587]
- 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]
- Datla R U, Rice J P, Lykke K R, Johnson B C, Butler J J and Xiong X X. 2011. Best practice guidelines for pre-launch characterization and calibration of instruments for passive optical remote sensing. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 116(2): 621-646 [DOI: 10.6028/jres.116.009]
- Doelling D R, Wu A S, Xiong X X, Scarino B R, Bhatt R, Haney C O, Morstad D and Gopalan A. 2015. The radiometric stability and scaling of collection 6 Terra-and Aqua-MODIS VIS, NIR, and SWIR spectral bands. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(8): 4520-4535 [DOI: 10.1109/TGRS.2015.2400928]
- Eplee R E, Sun J Q, Meister G, Patt F S, Xiong X X and McClain C R. 2011. Cross calibration of SeaWiFS and MODIS using on-orbit observations of the Moon. *Applied Optics*, 50(2): 120-133 [DOI: 10.1364/AO.50.000120]
- Fourest S, Kubik P, Lebègue L, Déchoz C, Lacherade S and Blanchet G. 2012. Star-based methods for Pleiades HR commissioning. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B1: 531-536 [DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-531-2012]
- 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 heliostudies (TRUTHS). *Advances in Space Research*, 32(11): 2253-2261 [DOI: 10.1016/S0273-1177(03)90551-5]
- Fox N and Green P. 2020. Traceable radiometry underpinning terrestrial- and heliostudies (TRUTHS): an element of a space-based climate and calibration observatory. *Remote Sensing*, 12(15): 2400 [DOI: 10.3390/rs12152400]
- Fox N, Green P, Brindley H, Russell J, Smith D, Lobb D, Cutter M and Barnes A. 2017. Traceable radiometry underpinning terrestrial and heliostudies (TRUTHS): a benchmark mission for climate//*Proceedings of SPIE 10563, International Conference on Space Optics (ICSO 2014)*. Tenerife: SPIE: 1056325 [DOI: 10.1117/12.2304220]
- Fox N, Shea Y, Fehr T, Gary F, Lukashin C, Pilewskie P, Remedios J and Smith P. 2021. Toward a climate and calibration observatory in space: NASA CLARREO pathfinder and ESA TRUTHS//*EGU General Assembly 2021*. [s.l.]: EGU: EGU21-14656 [DOI: 10.5194/egusphere-egu21-14656]
- Fox N P, Harrison N J, Hunt T M, Pollard D F, Windsor S and Woolliams E R. 2002. Improved transfer standard sources for calibration of Earth observation instruments//*Proceedings of SPIE 4483, Earth Observing Systems VI*. San Diego: SPIE: 176-184 [DOI: 10.1117/12.453452]
- Franks S, Neigh C S R, Campbell P K, Sun G Q, Yao T, Zhang Q Y, Huemrich K F, Middleton E M, Ungar S G and Frye S W. 2017. EO-1 data quality and sensor stability with changing orbital precession at the end of a 16 year mission. *Remote Sensing*, 9(5): 412 [DOI: 10.3390/rs9050412]
- Frouin R and Gautier C. 1987. Calibration of NOAA-7 AVHRR, GOES-5, and GOES-6 VISSR/VAS solar channels. *Remote Sensing of Environment*, 22(1): 73-101 [DOI: 10.1016/0034-4257(87)90028-9]
- Gao H L, Gu X F, Yu T, Sun Y and Liu Q Y. 2016. Cross-calibration of GF-1 PMS sensor with Landsat 8 OLI and Terra MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(8): 4847-4854 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2552242]
- Gellman D I, Biggar S F, Dinguirard M C, Henry P J, Moran M S, Thome K J and Slater P N. 1993. Review of SPOT-1 and -2 cali-

- brations at White Sands from launch to the present//Proceedings of SPIE 1938, Recent Advances in Sensors, Radiometric Calibration, and Processing of Remotely Sensed Data 1993. Orlando: SPIE: 118-125 [DOI: 10.1117/12.161536]
- Geng X W, Min J Z, Yang C, Wang Y B and Xu D M. 2020. Analysis of FY-4A AGRI radiance data bias characteristics and a correction experiment. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 44(4): 679-694 (耿晓雯, 闵锦忠, 杨春, 王元兵, 许冬梅. 2020. FY-4A AGRI 辐射率资料偏差特征分析及订正试验. 大气科学, 44(4): 679-694) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1907.18254]
- 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]
- Gorroño J, Banks A C, Fox N P and Underwood C. 2017. Radiometric inter-sensor cross-calibration uncertainty using a traceable high accuracy reference hyperspectral imager. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 130: 393-417 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.07.002]
- Group on Earth Observations (GEO) and Committee on Earth Observation Satellites (CEOS). 2012. A quality assurance framework for earth observation (QA4EO)[EB/OL]. [2021-11-10]. http://qa4eo.org/docs/qa4eo_implementation_strategy_for_ceos_and_geo_v0_4.pdf
- Gube M, Gärtner V and Schmetz J. 1996. Analysis of the operational calibration of the Meteosat infrared-window channel. Meteorological Applications, 3(4): 307-316 [DOI: 10.1002/met.5060030403]
- Guo Q, Chen B Y, Zhang Y, Xu N, Feng X, Yang C J, Wang X, Han X Z, Li Y, Hu X Q and Zhang Z Q. 2013. Progress in on-orbit radiometric calibration technology for Fengyun-2 satellite. Advances in Meteorological Science and Technology, 3(6): 6-12 (郭强, 陈博洋, 张勇, 徐娜, 冯绚, 杨昌军, 王新, 韩秀珍, 李元, 胡秀清, 张志清. 2013. 风云二号卫星在轨辐射定标技术进展. 气象科技进展, 3(6): 6-12) [DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.06.001]
- Han Q J, Fu Q Y, Pan Z Q, Wang A C and Zhang X W. 2013. Absolute radiometric calibration and validation analysis of ZY-3 using artificial targets. Infrared and Laser Engineering, 42(S1): 167-173 (韩启金, 傅俏燕, 潘志强, 王爱春, 张学文. 2013. 资源三号卫星靶标法绝对辐射定标与验证分析. 红外与激光工程, 42(S1): 167-173) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-2276.2013.z1.033]
- Han Q J, Min X J and Fu Q Y. 2010. In-flight absolute radiometric calibration for thermal infrared band of HJ-1B. Journal of Remote Sensing, 14(6): 1212-1225 (韩启金, 闵祥军, 傅俏燕. 2010. HJ-1B 热红外波段在轨绝对辐射定标. 遥感学报, 14(6): 1212-1225) [DOI: 10.11834/jrs.20100611]
- Hao X P, Sima R H, Liu Y, Song J, Wen P, Sun J P, Ding L, Yuan Z D, Wu Q, Liu Y M and Duan Y N. 2022. Experimental research on the temperature characterization of a miniature phase change cells in the blackbody for the on-orbit radiometric calibration of thermal infrared sensors. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 60: 5001808 [DOI: 10.1109/TGRS.2022.3143685]
- Hao X P, Song J, Ding L, Wen P, Sun J P, Liu Y, Yuan Z D, Duan Y N and Zhang Y. 2020. Spaceborne radiance temperature standard blackbody for Chinese high-precision infrared spectrometer. Metrologia, 57(6): 065016 [DOI: 10.1088/1681-7575/abbcc0]
- He X W, Feng X H, Han Q and Guo Q. 2020. Cross-calibration of FY-3C medium resolution spectral imager in reflective bands. Optics and Precision Engineering, 28(7): 1462-1470 (何兴伟, 冯小虎, 韩琦, 郭强. 2020. FY-3C MERSI 太阳反射波段的交叉定标. 光学精密工程, 28(7): 1462-1470) [DOI: 10.37188/OPE.20202807.1462]
- Heidinger A K, Cao C Y and Sullivan J T. 2002. Using Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) to calibrate advanced very high resolution radiometer reflectance channels. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 107(D23): 4702 [DOI: 10.1029/2001JD002035]
- Helder D, Anderson C, Beckett K, Houborg R, Zuleta I, Boccia V, Clerc S, Kuester M, Markham B and Pagnutti M. 2020. Observations and recommendations for coordinated calibration activities of government and commercial optical satellite systems. Remote Sensing, 12(15): 2468 [DOI: 10.3390/rs12152468]
- Helder D, Thome K J, Mishra N, Chander G, Xiong X X, Angal A and Choi T. 2013. Absolute radiometric calibration of Landsat using a pseudo invariant calibration site. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 51(3): 1360-1369 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2243738]
- 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]
- Helder D L, Karki S, Bhatt R, Micijevic E, Aaron D and Jasinski B. 2012. Radiometric calibration of the Landsat MSS sensor series. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50(6): 2380-2399 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2171351]
- Helder D L, Markham B L, Thome K J, Barsi J A, Chander G and Malala R. 2008. Updated radiometric calibration for the Landsat-5 Thematic Mapper reflective bands. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46(10): 3309-3325 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.920966]
- Holmes J M and Thome K. 2001. Comparison of modeled and measured downwelling, diffuse irradiance at a ground-reference calibration test site//2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Sydney: IEEE: 78-80 [DOI: 10.1109/IGARSS.2001.976062]
- Hu C Y, Hao X P, Song J, Wen P, Chang J Q, Gu M J and Ding L. 2019. Development of blackbody radiation sources at fixed point on satellite of infrared hyperspectral atmospheric detector. Acta Metrologica Sinica, 40(2): 232-239 (胡朝云, 郝小鹏, 宋健, 文平, 常稼强, 顾明剑, 丁雷. 2019. 红外高光谱大气探测仪星载固定点黑体辐射源的研制. 计量学报, 40(2): 232-239) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-1158.2019.02.10]
- Hu X Q, Rong Z G, Qiu K M, Zhang Y X, Zhang G S and Huang Y B. 2001. In-flight radiometric calibration for thermal channels of FY-1C and FY-2B meteorological satellite sensors using Qinghai

- Lake. *Chinese Journal of Space Science*, 21(4): 370-380 (胡秀清, 戎志国, 邱康睦, 张玉香, 张广顺, 黄意玢. 2001. 利用青海湖对 FY-1C、FY-2B 气象卫星热红外通道进行在轨辐射定标. *空间科学学报*, 21(4): 370-380) [DOI: 10.3969/j.issn.0254-6124.2001.04.012]
- Hu X Q, Rong Z G, Qiu K M, Zhang Y X, Zhang G S and Huang Y B. 2002. In-flight radiometric calibration for thermal channels of FY-1C meteorological satellite sensors using Qinghai Lake, water surface radiometric calibration site. *Journal of Remote Sensing*, 6(5): 328-333 (胡秀清, 戎志国, 邱康睦, 张玉香, 张广顺, 黄意玢. 2002. 利用青海湖水面辐射校正场对 FY-1C 气象卫星热红外传感器进行绝对辐射定标. *遥感学报*, 6(5): 328-333) [DOI: 10.11834/jrs.20020502]
- Hu X Q, Sun L, Liu J J, Ding L, Wang X H, Li Y, Zhang Y, Xu N and Chen L. 2013. Calibration for the solar reflective bands of medium resolution spectral imager onboard FY-3A. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 3(4): 71-83 (胡秀清, 孙凌, 刘京晶, 丁雷, 王向华, 李元, 张勇, 徐娜, 陈林. 2013. 风云三号 A 星中分辨率光谱成像仪反射太阳波段辐射定标. *气象科技进展*, 3(4): 71-83) [DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.008]
- 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 X Q, Zhang Y X and Qiu K M. 2003. In-flight radiometric calibration for VIR channels of FY-1C satellite sensor by using irradiance-based method. *Journal of Remote Sensing*, 7(6): 458-464 (胡秀清, 张玉香, 邱康睦. 2003. 采用辐照度基法对 FY-1C 气象卫星可见近红外通道进行绝对辐射定标. *遥感学报*, 7(6): 458-464) [DOI: 10.11834/jrs.20030605]
- Irons J R, Dwyer J L and Barsi J A. 2012. The next Landsat satellite: the Landsat data continuity mission. *Remote Sensing of Environment*, 122: 11-21 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.08.026]
- Javier Gorrano, Andrew C. Banks, Nigel P. Fox, Craig Underwood. 2017. Radiometric inter-sensor cross-calibration uncertainty using a traceable high accuracy reference hyperspectral imager. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130: 393-417. [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.07.002]
- Jia D, Han B, Song Q J, Gao F and Guo K. 2018. Overview of the on-board calibration techniques applied in ocean color satellites. *Journal of Ocean Technology*, 37(1): 113-121 (贾迪, 韩冰, 宋庆君, 高飞, 郭凯. 2018. 海洋水色卫星上定标技术综述. *海洋技术学报*, 37(1): 113-121) [DOI: 10.3969/j.issn.1003-2029.2018.01.019]
- Justice C O, Vermote E, Townshend J R G, Defries R, Roy D P, Hall D K, Salomonson V V, Privette J L, Riggs G, Strahler A, Lucht W, Myneni R B, Knyazikhin Y, Running S W, Nemani R R, Wan Z M, Huete A R, van Leeuwen W, Wolfe R E, Giglio L, Muller J, Lewis P and Barnsley M J. 1998. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1228-1249 [DOI: 10.1109/36.701075]
- Kieffer H H. 1997. Photometric stability of the lunar surface. *Icarus*, 130(2): 323-327 [DOI: 10.1006/icar.1997.5822]
- Kim W, Cao C Y and Liang S L. 2014. Assessment of radiometric degradation of FY-3A MERIS reflective solar bands using TOA reflectance of pseudoinvariant calibration sites. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(4): 793-797 [DOI: 10.1109/LGRS.2013.2279134]
- Kopp G, Belting C, Castleman Z, Drake G, Espejo J, Heurman K, Lamprecht B, Lanzi J, Smith P, Stuchlik D and Vermeer B. 2014. First results from the hyperspectral imager for climate science (HySICS)//*Proceedings of SPIE 9088, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XX*. Baltimore: SPIE: 90880Q [DOI: 10.1117/12.2053426]
- Kopp G, Smith P, Belting C, Castleman Z, Drake G, Espejo J, Heurman K, Lanzi J and Stuchlik D. 2017. Radiometric flight results from the HyperSpectral Imager for Climate Science (HySICS). *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 6(1): 169-191 [DOI: 10.5194/gi-6-169-2017]
- Kriebel K T. 1981. Calibration of the METEOSAT-VIS-channel by airborne measurements. *Applied Optics*, 20(1): 11-12 [DOI: 10.1364/AO.20.000011]
- Labandibar J Y, Baudin G and Baillion Y. 2004. Alcatel-space in hyper/multispectral earth observation programs from MERIS to SPECTRA//*Proceedings of SPIE 5234, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VII*. Barcelona: SPIE: 232-242 [DOI: 10.1117/12.514035]
- Lacherade S, Fougne B, Henry P and Gamet P. 2013. Cross calibration over desert sites: description, methodology, and operational implementation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1098-1113 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2227061]
- Li S, Ganguly S, Dungan J L, Wang W L and Nemani R R. 2017. Sentinel-2 MSI radiometric characterization and cross-calibration with Landsat-8 OLI. *Advances in Remote Sensing*, 6(2): 147-159 [DOI: 10.4236/ars.2017.62011]
- Li X, Zheng X B and Yin Y P. 2014. Progress in automated site vicarious calibration technologies. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 9(1): 17-21 (李新, 郑小兵, 尹亚鹏. 2014. 场地自动化定标技术进展. *大气与环境光学学报*, 9(1): 17-21)
- Liu J J, Li Z, Qiao Y L, Liu Y J and Zhang Y X. 2004. A new method for cross-calibration of two satellite sensors. *International Journal of Remote Sensing*, 25(23): 5267-5281 [DOI: 10.1080/01431160412331269779]
- Liu L, Fu Q Y, Pan Z Q, Xu J Y, Li X J, Han Q J, Zhang X W and Liu T. 2016. Site calibration of CBERS-04 WFI using reflectance-based method. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 37(1): 89-96 (刘李, 傅俏燕, 潘志强, 徐建艳, 李晓进, 韩启金, 张学文, 刘涛. 2016. CBERS-04 卫星宽视场成像仪在轨场地辐射定标. *航天返回与遥感*, 37(1): 89-96) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2016.01.011]
- Liu L, Fu Q Y, Shi T T, Wang A C and Zhang X W. 2014. Validation of HJ-1B thermal infrared channels onboard radiometric calibration based on spectral response differences. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 34(8): 2212-2217 (刘李, 傅俏燕, 史婷婷, 王爱春, 张学文. 2014. 基于光谱响应差异的 HJ-1B 热红外通道星上定标系数验证. *光谱学与光谱分析*, 34(8): 2212-2217) [DOI: 10.3964/j.

- issn.1000-0593(2014)08-2212-06]
- Liu L, Gu X F, Yu T, Li X Y, Gao H L, Li J G and Shi T T. 2012. HJ-1B thermal infrared band in-flight radiometric calibration and validation. *Infrared and Laser Engineering*, 41(5): 1119-1125 (刘李, 顾行发, 余涛, 李小英, 高海亮, 李家国, 史婷婷. 2012. HJ-1B 卫星热红外通道在轨场地定标与验证. *红外与激光工程*, 41(5): 1119-1125) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-2276.2012.05.002]
- Liu Y K, Ma L L, Wang N, Qian Y G, Qiu S, Li C R and Tang L L. 2017. Vicarious radiometric calibration/validation of Landsat-8 operational land imager using a ground reflected radiance-based approach with Baotou site in China. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(4): 044004 [DOI: 10.1117/1.JRS.11.044004]
- Liu N M, Ding L, Zheng X B, Ye X, Li C R, Lv 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*, 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]
- Lukashin C, Wielicki B A, Young D F, Thome K, Jin Z H and Sun W B. 2013. Uncertainty estimates for imager reference inter-calibration with CLARREO reflected solar spectrometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1425-1436 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2233480]
- Ma L L, Wang N, Liu Y K, Zhao Y G, Han Q J, Wang X H, Woolliams E R, Bouvet M, Gao C X, Li C R and Tang L L. 2022. An in-flight radiometric calibration method considering adjacency effects for high-resolution optical sensors over artificial targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 5600913 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3040866]
- 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]
- Ma Z H, Ma L L, Liu Y K, Zhao Y G, Wang N, Li C R and Tang L L. 2019. A method for hyperspectral reflectance reconstruction from automatic observation with multispectral radiometer. *Acta Optica Sinica*, 39(7): 0728004 (马志宏, 马灵玲, 刘耀开, 赵永光, 王宁, 李传荣, 唐伶俐. 2019. 通道式辐射计自动观测数据的反射率光谱拓展方法. *光学学报*, 39(7): 0728004) [DOI: 10.3788/AOS201939.0728004]
- Markham B, Barsi J, Kvaran G, Ong L, Kaita E, Biggar S, Czaplak-Myers J, Mishra N and Helder D. 2014. Landsat-8 operational land imager radiometric calibration and stability. *Remote Sensing*, 6(12): 12275-12308 [DOI: 10.3390/rs61212275]
- Markham B L and Helder D L. 2012. Forty-year calibrated record of earth-reflected radiance from Landsat: a review. *Remote Sensing of Environment*, 122: 30-40 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.06.026]
- Markham B L, Thome K J, Barsi J A, Kaita E, Helder D L, Barker J L and Scaramuzza P L. 2004. Landsat-7 ETM+ on-orbit reflective-band radiometric stability and absolute calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(12): 2810-2820 [DOI: 10.1109/TGRS.2004.836389]
- Mendenhall J A, Lencioni D E and Parker A C. 1999. Radiometric calibration of the EO-1 advanced land imager//Proceedings of SPIE 3750, Earth Observing Systems IV. Denver: SPIE: 117-131 [DOI: 10.1117/12.363505]
- Miller S D and Turner R E. 2009. A dynamic lunar spectral irradiance data set for NPOESS/VIIRS day/night band nighttime environmental applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(7): 2316-2329 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2012696]
- Padula F P and Schott J R. 2010. Historic calibration of the thermal infrared band of Landsat-5 TM. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76(11): 1225-1238 [DOI: 10.14358/PERS.76.11.1225]
- 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]
- Qi C L, Wu C Q, Hu X Q, Xu H L, Lee L, Zhou F, Gu M J, Yang T H, Shao C Y, Yang Z D and Zhang P. 2020. High Spectral Infrared Atmospheric Sounder (HIRAS): system overview and on-orbit performance assessment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(6): 4335-4352 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2963085]
- Roithmayr C M, Lukashin C, Speth P W, Kopp G, Thome K, Wielicki B A and Young D F. 2014. CLARREO approach for reference intercalibration of reflected solar sensors: on-orbit data matching and sampling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(10): 6762-6774 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2302397]
- Rong Z G, Qiu K M, Hu X Q and Zhang Y X. 2002. Comparison of pre-launch calibration in lab with the radiometric calibration in orbit for FY-2B meteorological satellite's IR channel. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 21(6): 408-412 (戎志国, 邱康睦, 胡秀清, 张玉香. 2002. FY-2B 气象卫星红外通道发射前实验室定标与在轨辐射定标比较. *红外与毫米波学报*, 21(6): 408-412)
- Russell, R. W., R. Rudy, D. Lynch, D. Kim, G. Rossano, T. Prater, D. Gutierrez, K. Crawford, C. Venturini, M. Skinner, and M. Sitko. 2007. Application of ground observations of stellar sources to on-orbit sensor calibration. 16th Annual Conference on Characterization and Radiometric Calibration for Remote Sensing, (CALCON). Logan, UT
- Santer R and Berthelot B. 2009. Recommendation for the calibration for Sentinels: S2 and S3[EB/OL]. [2022-11-10]. https://calvalportal.ceos.org/c/document_library/get_file?uuid=b10e77b2-4852-486a-81b2-0b04fe181e5f&groupId=10136
- Schott J R, Hook S J, Barsi J A, Markham B L, Miller J, Padula F P and Raqueno N G. 2012. Thermal infrared radiometric calibration

- of the entire Landsat 4, 5, and 7 archive (1982—2010). *Remote Sensing of Environment*, 122: 41-49 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.07.022]
- Sheng Y C, Dun X, Jin W Q, Guo Y X, Zhou F and Xiao S. 2019. Review of on-orbit radiometric calibration technology used in infrared remote sensors. *Infrared and Laser Engineering*, 48(9): 0904001 (盛一成, 顿雄, 金伟其, 郭一新, 周峰, 肖思. 2019. 星上红外遥感相机的辐射定标技术发展综述. *红外与激光工程*, 48(9): 0904001) [DOI: 10.3788/IRLA201948.0904001]
- Shi L and Bates J J. 2011. Three decades of intersatellite-calibrated High-Resolution Infrared Radiation Sounder upper tropospheric water vapor. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D4): D04108 [DOI: 10.1029/2010JD014847]
- Sima R H, Hao X P, Song J, Qi H, Yuan Z D, Ding L and Duan Y N. 2021. Research on the temperature transfer relationship between miniature fixed-point and blackbody for on-orbit infrared remote sensor calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(7): 6266-6276 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3023455]
- Slater P N, Biggar S F, Holm R G, Jackson R D, Mao Y, Moran M S, Palmer J M and Yuan B. 1987. Reflectance- and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors. *Remote Sensing of Environment*, 22(1): 11-37 [DOI: 10.1016/0034-4257(87)90026-5]
- Slater P N, Biggar S F, Thome K J, Gellman D I and Spyak P R. 1996. Vicarious radiometric calibrations of EOS sensors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 13(2): 349-359 [DOI: 10.1175/1520-0426(1996)013<0349:VRCOES>2.0.CO;2]
- Smith J, Thome K, Crowther B and Biggar S. 1998. Field evaluation of a diffuse to global irradiance meter for vicarious calibration// 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Seattle: IEEE: 663-665 [DOI: 10.1109/IGARSS.1998.699544]
- Song J, Hao X P, Yuan Z D and Ding L. 2020. Integrating-sphere-free reflectometry of blackbody cavity emissivity using the ratio of hemispherical-given solid angle reflections. *Optics Express*, 28(16): 23294-23305 [DOI: 10.1364/OE.394325]
- Stone T C and Kieffer H H. 2004. Assessment of uncertainty in ROLO lunar irradiance for on-orbit calibration//Proceedings of SPIE 5542, Earth Observing Systems IX. Denver: SPIE: 300-310 [DOI: 10.1117/12.560236]
- Sun L, Guo M H, Xu N, Zhang L J, Liu J J, Hu X Q, Li Y, Rong Z G and Zhao Z H. 2012. On-orbit response variation analysis of FY-3 MERSI reflective solar bands based on Dunhuang site calibration. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 32(7): 1869-1877 (孙凌, 郭茂华, 徐娜, 张立军, 刘京晶, 胡秀清, 李元, 戎志国, 赵泽会. 2012. 基于敦煌场地定标的FY-3 MERSI反射太阳波段在轨响应变化分析. *光谱学与光谱分析*, 32(7): 1869-1877) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)07-1869-09]
- Tansock J, Bancroft D, Butler J, Cao C Y, Datta R, Hansen S, Helder D, Kacker R, Latvakoski H, Mlynczak M, Murdock T, Peterson J, Pollock D, Russell R, Scott D, Seamons J, Stone T, Thurgood A, Williams R, Xiong X X and Yoon H. 2015. Guidelines for radiometric calibration of electro-optical instruments for remote sensing[EB/OL]. [2021-11-10]. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/hb/2015/NIST.HB.157.pdf> [DOI: 10.6028/NIST.HB.157]
- Thome K J. 2001. Absolute radiometric calibration of Landsat 7 ETM+ using the reflectance-based method. *Remote Sensing of Environment*, 78(1/2): 27-38 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00247-4]
- Thome K J, Arai K, Tsuchida S and Biggar S F. 2008. Vicarious calibration of ASTER via the reflectance-based approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(10): 3285-3295 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.928730]
- Thome K J, Biggar S F and Choi H J. 2004a. Vicarious calibration of Terra ASTER, MISR, and MODIS//Proceedings of SPIE 5542, Earth Observing Systems IX. Denver: SPIE: 290-299 [DOI: 10.1117/12.559942]
- Thome K J, Biggar S F and Wisniewski W. 2003. Cross comparison of EO-1 sensors and other Earth resources sensors to Landsat-7 ETM+ using Railroad Valley Playa. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1180-1188 [DOI: 10.1109/TGRS.2003.813210]
- Thome K J, Crowther B G and Biggar S F. 1997. Reflectance- and irradiance-based calibration of Landsat-5 Thematic Mapper. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 23(4): 309-317 [DOI: 10.1080/07038992.1997.10855217]
- Thome K J, Helder D L, Aaron D and Dewald J D. 2004b. Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ absolute radiometric calibration using the reflectance-based method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(12): 2777-2785 [DOI: 10.1109/TGRS.2004.839085]
- Tong J J, Qiu K M and Li X W. 2004. Absolute radiometric calibration for thermal infrared bands of FY2B by using NCEP reanalyzed data in Qinhai Lake//2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Anchorage: IEEE: 3960-3962 [DOI: 10.1109/IGARSS.2004.1369994]
- Tong J J, Qiu K M and Li X W. 2005. New method of in-flight absolute calibration for thermal infrared channels of satellite sensors. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 24(4): 277-280 (童进军, 邱康睦, 李小文. 2005. 一种卫星遥感仪器热红外通道在轨绝对辐射定标新方法. *红外与毫米波学报*, 24(4): 277-280) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-9014.2005.04.009]
- Tonooka H, Palluconi F D, Hook S J and Matsunaga T. 2005. Vicarious calibration of ASTER thermal infrared bands. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(12): 2733-2746 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.857885]
- Twedt K. 2021. NOAA-20 VIIRS reflective solar band calibration[EB/OL]. [2021-11-10]. <https://ncc.nesdis.noaa.gov/NOAA-20/docs/Meetings/March2021/2021-03-03%20NASA%20VCST%20N20%20RSB%20calibration.pdf>
- Upreti S, Cao C Y, Xiong X X, Blonski S, Wu A S and Shao X. 2013. Radiometric intercomparison between *Suomi-NPP* VIIRS and *Aqua* MODIS reflective solar bands using simultaneous nadir overpass in the low latitudes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(12): 2720-2736 [DOI: 10.1175/JTECH-D-13-00071.1]

- Urabe T, Xiong X X, Hashiguchi T, Ando S, Okamura Y, Tanaka K and Mokuno M. 2019. Lunar calibration inter-comparison of SGLI, MODIS and VIIRS//2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Yokohama: IEEE: 8481-8484 [DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8897892]
- Vermote E F and Saleous N Z. 2006. Calibration of NOAA16 AVHRR over a desert site using MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 105(3): 214-220 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.06.015]
- Wang D D, Morton D, Masek J, Wu A S, Nagol J, Xiong X X, Levy R, Vermote E and Wolfe R. 2012. Impact of sensor degradation on the MODIS NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*, 119: 55-61 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.12.001]
- 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 2017. Warsaw: SPIE: 104271J [DOI: 10.1117/12.2278072]
- Wang W, Zhang L M, Si X L, Huang W X and Wang J X. 2019. On-orbit degradation monitoring technology for solar diffuser reflectance. *Acta Optica Sinica*, 39(7): 0728005 (汪伟, 张黎明, 司孝龙, 黄文蔚, 王戟翔. 2019. 太阳漫射板反射率在轨衰退监测技术研究. *光学学报*, 39(7): 0728005) [DOI: 10.3788/AOS201939.0728005]
- Wei W, Li X, Zhao C Y, Qiu G G and Zheng X B. 2016. In-flight absolute radiometric calibration of MODIS using the irradiance-based method//Proceedings of SPIE 10156, Hyperspectral Remote Sensing Applications and Environmental Monitoring and Safety Testing Technology. Beijing: SPIE: 101561M [DOI: 10.1117/12.2247217]
- Wielicki B A, Doelling D R, Young D F, Loeb N G, Garber D P and MacDonnell D G. 2008. Climate quality broadband and narrow-band solar reflected radiance calibration between sensors in orbit//2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Boston: IEEE: I-257-I-260 [DOI: 10.1109/IGARSS.2008.4778842]
- Wielicki B A, Young D F, Mlynzczak 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]
- Williams S P, Szajna E F and Hovis W A. 1985. NIMBUS 7 Coastal Zone Color Scanner (CZCS): Level 1 Data Product Users' Guide. National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Branch
- Xiong X X, Angal A, Madhavan S, Choi T, Dodd J, Geng X, Wang Z P, Toller G and Barnes W. 2010. Aqua MODIS 8-year on-orbit operation and calibration//Proceedings of SPIE 7826, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIV. Toulouse: SPIE: 78261X [DOI: 10.1117/12.864172]
- Xiong X X and Butler J J. 2020. MODIS and VIIRS calibration history and future outlook. *Remote Sensing*, 12(16): 2523 [DOI: 10.3390/rs12162523]
- Xiong X X, Che N and Barnes W L. 2006. Terra MODIS on-orbit spectral characterization and performance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(8): 2198-2206 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.872083]
- Xiong X X, Sun J Q and Barnes W. 2008. Intercomparison of on-orbit calibration consistency between Terra and Aqua MODIS reflective solar bands using the moon. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(4): 778-782 [DOI: 10.1109/LGRS.2008.2005591]
- Xiong X X, Sun J Q, Wu A S, Chiang K F, Esposito J and Barnes W. 2005. Terra and Aqua MODIS calibration algorithms and uncertainty analysis//Proceedings of SPIE 5978, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites IX. Bruges: SPIE: 59780V [DOI: 10.1117/12.627631]
- Xu N, Chen L, Wu R H, Hu X Q, Sun L and Zhang P. 2014. In-flight intercalibration of FY-3C visible channels with AQUA MODIS//Proceedings of SPIE 9264, Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization III. Beijing: SPIE: 926408 [DOI: 10.1117/12.2071185]
- Xu N, Niu X H, Hu X Q, Wang X H, Wu R H, Chen S S, Chen L, Sun L, Ding L, Yang Z D and Zhang P. 2018. Pre-launch calibration and radiometric performance of the advanced MERSI II on FengYun-3D. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(8): 4866-4875 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2841827]
- Yang B Y, Zhang L M, Shen Z G and Qiao Y L. 2009. Characteristic measurement of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors. *Optics and Precision Engineering*, 17(8): 1851-1858 (杨本永, 张黎明, 沈政国, 乔延利. 2009. 光学传感器星上定标漫射板的特性测量. *光学精密工程*, 17(8): 1851-1858) [DOI: 10.3321/j.issn:1004-924X.2009.08.011]
- Yang M, Liu Z Y, Zhao Y G, Ma L L, Li W, Wang N, Li C R and Tang L L. 2021. On-orbit radiometric calibration method for satellites based on TOA reflectance at Baotou site. *Acta Optica Sinica*, 41(18): 1828001 (杨敏, 刘照言, 赵永光, 马灵玲, 李婉, 王宁, 李传荣, 唐伶俐. 2021. 基于包头场 TOA 反射率的卫星在轨辐射定标方法. *光学学报*, 41(18): 1828001) [DOI: 10.3788/AOS202141.1828001]
- Zhang D Y, Qiao Y L, Yi W N, Yang S Z, Meng F G, Wu H Y and Zhang J P. 2002. The radiance-based method research of experimentation on radiometric calibration site - the comparison of synchronous observing instruments. *Optoelectronic Technology and Information*, 15(3): 9-13 (张冬英, 乔延利, 易维宁, 杨世植, 孟凡刚, 吴浩宇, 章骏平. 2002. 基于辐照度法的场地辐射校正试验研究——场地同步观测仪器的比较. *光电子技术与信息*, 15(3): 9-13)
- 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 Y X, Zhang G S, Huang Y B, Qiu K M, Hu X Q, Rong Z G, Wang W H, Liu Z Q, Zhang L J, Zhu S B, Wang Y K, Li C B, Xia Q, Chen X L and Fang Z Y. 2002. In-flight vicarious radiometric calibration for VIS-NIR channels of FY-1C satellite sensor at Dunhuang site. *Acta Meteorologica Sinica*, 60(6): 740-747 (张玉香, 张广顺, 黄意玢, 邱康睦, 胡秀清, 戎志国, 王维和, 刘志权, 张立军, 朱舜斌, 王永宽, 李昌宝, 夏青, 陈秀莲, 方宗义. 2002. FY-1C 遥感器可见近红外各通道在轨辐射定标. *气象学报*, 60(6): 740-747) [DOI: 10.11676/qxxb2002.088]
- Zhao Y G, Ma L L, Li C R, Gao C X, Wang N and Tang L L. 2018. Radiometric cross-calibration of Landsat-8/OLI and GF-1/PMS sensors using an instrumented sand site. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(10): 3822-3829 [DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2862638]
- Zhou G Q, Li C Y, Yue T, Jiang L J, Liu N, Sun Y and Li M Y. 2015. An overview of in-orbit radiometric calibration of typical satellite sensors. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-7/W4: 235-240 [DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-7-W4-235-2015]

On-orbit absolute radiometric calibration for optical remote sensing satellites: Progress and trends

MA Lingling¹, WANG Ning¹, GAO Caixia¹, ZHAO Yongguang¹, YANG Benyong², WANG Xinhong¹, HAN Qijin³, XU Na⁴, SONG Peilan^{1,5}, LIU Yaokai¹

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

2. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3. China Centre for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China;

4. National Meteorological Satellite Center, Beijing 100081, China;

5. College of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract: On-orbit absolute radiometric calibration is an important prerequisite for the quantitative application of optical remote sensing satellite data. Given the complicated transfer chain of the radiometric benchmark that is difficult to realize, traditional field calibration (which takes at-ground measured target characteristics as a radiometric benchmark) may be inevitably affected by uncertainty factors, such as scale effect, atmospheric condition, and space environment perturbation. To date, the accuracy, consistency, and traceability of on-orbit radiometric calibration are still difficult to be solved. To address these problems, the “calibration benchmark satellite” can be used to carry spaceborne radiometric benchmark sensors and transfer their high-accuracy radiometric measurement values to other operational optical remote sensing satellites by synchronously observing the same at-ground targets/scenes. By precisely assessing the uncertainties introduced in various steps in the whole transfer chain, high consistency and traceability among different satellite remote sensing products can be achieved. In this study, starting with the technical requirements of on-orbit radiometric calibration for optical remote sensing satellites, the authors reviewed and described the developing processes and technical challenges related to common methods of on-orbit radiometric calibration, such as on-board, field, cross, and lunar-based calibrations. Furthermore, the most advanced calibration technology at present, namely, space-borne radiometric benchmark transfer calibration, was illustrated. In this advanced calibration scheme, radiometric benchmark sources that are traceable to the international system of units are installed in a small number of benchmark satellites. Consistent, high-accuracy, on-board radiometric benchmarks can be transferred to multi-series of operational satellites by means of cross-calibration based on synchronous observation of Earth/moon scenes. This calibration scheme is expected to extensively improve the international technical level of calibration and guarantee highly consistent and highly stable multi-source satellite data.

Key words: optical remote sensing, radiometric calibration, benchmark transfer, traceability

Supported by National Key Research and Development Program (No. 2018YFB0504800, 2018YFB0504805, 2018YFB0504900, 2018YFB0504903)