

文章编号 1004-924X(2015)07-1921-11

卫星光学仪器辐射交互定标方法的应用和发展

赵维宁^{1,2}, 胡秀清^{3,4}, 方 伟², 王玉鹏^{2*}, 徐 娜^{3,4}

- (1. 中国科学院大学, 北京 100049;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
3. 中国气象局 国家卫星气象中心, 北京 100081;
4. 中国气象局 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 卫星遥感器的在轨交互定标是保证仪器数据记录的可靠性、连续性和一致性的核心方案, 配合高精度的在轨参考基准仪器可使定标精度达到 2% 左右。本文介绍了交互定标技术的相关概念和意义, 强调该技术是修正仪器间辐射定标相对偏差的重要手段。指出了交互定标的前提条件及现存难点。总结了交互定标实现流程, 包括数据收集、匹配、筛选、处理, 基准确定, 精度分析等, 分析了影响交互定标精度的各种因素。叙述了当前卫星光学遥感器交互定标的各类方法及其使用条件, 总结了不同应用条件下所适用的各交互定标方法的定标精度。最后结合当前交互定标的国际合作活动, 分析展望了未来光学遥感器在轨可溯源 SI 定标方法的前景趋势和难点问题。

关键词: 星载光学仪器交互定标; 地球观测系统; 替代定标; 国际合作; 溯源性; 精确度

中图分类号: TP732 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152307.1921

Development and applications of intercalibration for satellite optical instruments

ZHAO Wei-ning^{1,2}, HU Xiu-qing^{3,4}, FANG Wei², WANG Yu-peng^{2*}, XU Na^{3,4}

- (1. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
 2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
 3. *National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;*
 4. *Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)*
- * *Corresponding author, E-mail: wangyp@ciomp.ac.cn*

Abstract: The on-orbit intercalibration between satellite instruments is the central method to ensure the reliability, consistency and the continuity of observation data. The calibration uncertainty of 2% has been achieved combined with high-accuracy reference on-orbit instruments. This paper introduces the concepts and significance of the intercalibration and emphasizes which is a main way to correct the

收稿日期: 2015-03-20; **修订日期:** 2015-04-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 41474161); 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所前沿领域创新基金资助项目 (No. Y3CX1SS14A)

relative deviation of radiation calibration between instruments. It gives the basis conditions to complete the intercalibration and discusses the existing difficulties. Then, the realized process of the intercalibration is summed up such as the data collocating, filtering, correcting, reference changing and accuracy analyzing, and the effect factors on the calibration accuracy are analyzed. Moreover, it describes the current intercalibration methods for satellite optical remote sensing and needed conditions and summarizes the uncertainty of different intercalibration methods under different conditions for post-launch radiometric calibration of satellite remote sensors. In the end, this paper introduces a few international organizations and some ongoing joint campaigns with focusing on instrument calibration and validation, which shows the recent advance of research on the SI intercalibration in orbit.

Key words: satellite optical instrument; intercalibration; earth observing system; vicarious calibration; international collaboration; traceability; accuracy

1 引言

1.1 交互定标方法的价值及目标

卫星观测已经成为信息时代不可或缺的部分,在学术,商业,政府等领域都有着广泛影响。目前,科学技术的进步和应用领域的扩展对卫星观测的可用性和可靠性提出了更严格的要求,尤其是监测地球环境变化,气象预报,土地覆盖变化,大气变化等研究,直接受卫星数据质量精度的影响。

地球观测(EO)仪器收集的数据是处理全球环境问题的关键,因此对其特性描述和精确定标,尤其是对相对偏差的了解,对于持续协调地对地观测极其重要。交互定标的方法提供了一种识别并修正仪器间辐射定标相对偏差的手段,由于可使一段时间内测量记录间的潜在数据缺失得到桥连,目前仪器间交互定标成为了各大卫星遥感组织定标/验证(Cal/Val)方案的核心研究点。

交互定标方法可以使不同仪器在轨所获得的观测数据统一量度、规范尺度以进行比较评价,可以建立卫星仪器定标的在轨参考基准并保证其长期有效性和可靠性。通过健全的交互定标系统体系建立完整的仪器定标传递链,从而全面理解卫星观测参数,最终提升卫星仪器数据结果的一致性,改进不确定度水平,达到气候监测要求的精度水平。

1.2 交互定标的前提条件及发展现状

卫星仪器间进行交互定标的基本前提是两个仪器在看向同一目标的相同时间内做一致的测

量,并拥有相同的空间和光谱响应度以及相同的观测位置。由于很难同时赋予两个仪器理想的条件,故需要利用一系列的阈值来统筹配置数据并转换成可相互比较的尺度,以实现定量相对偏差、修正偏差和确定偏差起因并消除偏差的目的。交互定标还要求配置数据覆盖所有光谱谱段以定量偏差的光谱变化,覆盖所有场景辐射来定量偏差的动态范围,覆盖所有地理范围、观测位置以及白昼时间以便定量地理位置上、几何角度上以及每日的偏差变化,覆盖卫星寿命内每个阶段来定量偏差变化的长期趋势。这是目前能清楚解释的完全可溯源参考基准的唯一方法。因此,要求仪器必须提供随时间进行的可靠、准确以及连续的测量^[1]。

由于修正仪器自身定标系统的不足较为困难,因此交互定标成为辅助许多科学研究的有效工具。现阶段交互定标的应用成果包括:先进极高分辨率辐射仪(Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR)^[2-3]辐射定标能力的提升,AVHRR 红外定标的修正^[4-5];高分辨率红外辐射探测仪(High Resolution Infrared Radiation Sounder, HIRS)^[6]光谱响应函数(SRF)误差的诊断修正,以及地球静止轨道气象卫星(GOES)成像仪 13.3 μm 通道冷偏差检测^[7-8];GOES 成像仪红外通道白天扫描角度变化定标的评价^[9];GOES 杂散光的确认以及杂散光消除的验证等^[9]。

1.3 交互定标在轨溯源途径及现存难点

利用交互定标来实现可溯源至 SI 的高精度在轨定标,需要以下步骤:

(1)设计推选“凝视仪器”和在轨参考仪器相比对,达到支撑交互定标方法标定、修正、稳定监测和质量保证的目的。

(2)全面了解仪器间相对偏差,对数据在高可信度水平下进行修正统一。着重研究 EO 仪器的定标精度和时间一致性,以决定数据的质量。

(3)依靠系列卫星监测数据的联合使用^[10-11],获得最大时间空间覆盖,完成以 10 年为单位的长时间气候变化监测研究。

(4)建立稳定的可定标溯源至 SI 的“公共参考标准”,并用来与仪器进行交互定标是实现在轨溯源 SI 定标的最佳途径。未来,可溯源 SI 在轨公共标准会将所有仪器的定标与绝对基准相连接,美国的 CLARREO^[15] 以及英国的 TRUTHS^[16] 就是典型的计划。然而,目前可供选择的方案是将所有仪器定标溯源至一个公认的最佳参考源,可以是地球(如 Dome-C^[12])或空间(如月球^[13])的稳定目标,也可以是一套测量标定好的场地,或者稳定的定标过的星载仪器。

实现上述可溯源 SI 的在轨辐射交互定标的过程中,存在着多方面亟待解决的难点:

(1)现存仪器多是不同时期研制的,所用技术手段不同,未做过严格的系统级发射前定标,是否搭载在轨定标设备以及设备的定标精度也参差不齐。因此,无法建立定标的可溯源性和稳定性。

(2)伴随卫星发射时的剧烈压力和严酷的太空环境使得多数光学仪器在其发射后的运行中很难保持自身特性不变,会产生衰减。因此,需要提高仪器间在轨定标比较和自定标精度。

(3)交互定标参考仪器需要具备高精度在轨自定标、长期在轨稳定以及性能实时可监测的特征,持续保障一系列参考仪器的数据连续性、一致性及长期可用性较困难。

(4)为了满足对卫星数据可靠性越来越严格的要求,国家机构和国际组织间应展开合作,将卫星仪器数据准确联合,实现高质量业务服务。

2 交互定标方法整体概述

2.1 交互定标实现流程

大多数卫星仪器会在发射前定标,仪器响应度会随着操作环境和老化程度发生变化,必须进

行有规律的发射后定标,如交互定标。发射后定标对于保证辐射定标的稳定性非常重要,没有在轨定标设备的仪器需要通过交互定标来进行数据监测。将 DN 值向遥感器光谱辐射量和大气层顶部反射率(TOA)的转换是比较不同遥感器输出的基本步骤^[14],建立交互定标标准流程(如图 1 所示)可以改进提高定标能力和仪器表现,交互定标是利用未来在轨溯源 SI 基准进行卫星仪器定标所必需的传递方法。

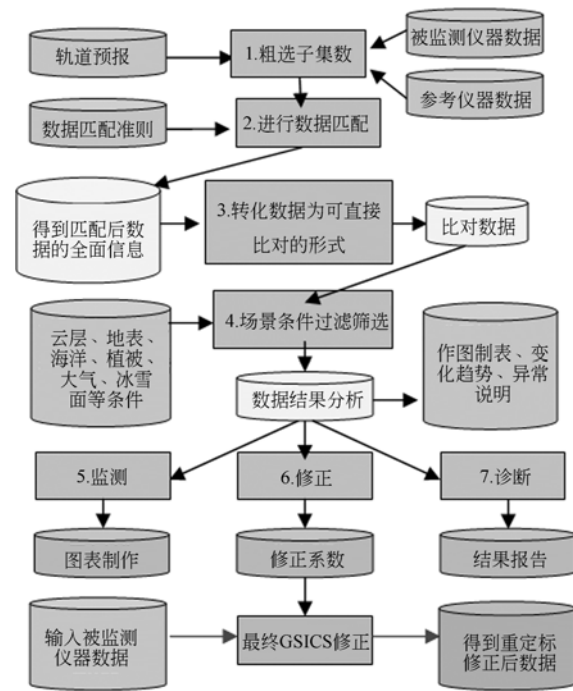


图 1 GSICS 通用的卫星仪器交互定标方法流程图
Fig. 1 Generic flowchart of intercalibration approach between satellite instruments

2.2 交互定标精度影响因素分析

从交互定标的流程中存在 3 点影响交互定标精度的因素。

(1) 参考基准仪器的选择:

参考仪器的观测数据是在轨公共标准,运用这些数据可对其他仪器进行交互定标。任何参考仪器都需要具备自身定标的高精度溯源性和自身辐射稳定性,理想情况参考仪器的光谱范围应覆盖被监测仪器的通道并能完好匹配,以便将光谱波段调整系数(SBAF)引入的误差最小化。

GSICS(全球空间交互定标系统)使用 Metop 上的干涉式红外大气探测仪(IASI)作为 GSICS

的交互定标卫星参考仪器^[11],通过 Aqua 卫星上的大气红外探测仪(AIRS)作为传递基准来扩展 Metop 不能覆盖的时间段^[17],IASI 与 AIRS 一致性的不确定度约为 $0.1\text{ K}(k=1)$ ^[18]。对于 RS-Bs(太阳反射波段),中分辨率成像光谱仪(MODIS)提供了良好的稳定性和光谱覆盖范围,且具有健全的在轨定标方案,Aqua MODIS 被 GSICS 选做目前 RSB 通道的参考仪器。

(2) 取样差异

交互定标首先要比较来自多组卫星仪器的观测数据,既可以是匹配观测的直接比较,也可以是与一个参考源的间接比较,用于比对的数据取样准则决定了对整体不确定度的贡献^[11];取样时的一致性差异会引入系统误差进入场景中,由大气层或地表的多变性引起的空间和时间上的改变会在观测数据中引入随机误差。

1. 光谱方面:EO 中不同的应用和技术发展都需要不同的光谱覆盖范围,由于不同仪器有不同的相关光谱响应度(RSRs),仪器间 RSR 的不同引发了系统间的带宽补偿,利用 SBAF 方法可以对光谱带宽差异进行补偿^[19-20]。

2. 空间分辨率:空间分辨率的影响在拥有大地面刈幅和高天底可视偏角的仪器上最为显著。为了将空间分辨率和目标不均匀性的影响最小化,采用广阔同质取样区域(ROIs)的天底点图像和调制传递函数(MTF)^[21]来定量描述空间分辨率的特征。

3. 辐射分辨率:高精度数字化将提供高的仪器敏感性并允许捕获更多量级的辐射数据。对于红外和微波段来说,辐射噪声是影响数字化的主要因素,通常通过估算单个像元的噪声并将多个像元的均值与整体噪声相比较来确定交互定标的噪声。

4. 时间性和观测角度:即使在同一天很短时段内拍摄成像,由于太阳天顶角的变化会改变入射路径及照度,配合大气变化和观测目标的双向反射分布函数(BRDF),在不同角度天底点观测时,会影响仪器接收辐射量的差异。

(3) 场景变量

交互定标经常需要比较不同仪器在空间、时

间和视场角度一致时的观测数据。鉴于这些条件不会精确地出现,通常应用阈值来选择匹配的数据,阈值会因匹配准则中的场景变量而影响交叉比对的不确定度。匹配准则表征了每个配置数据误差与可用匹配数量之间的折中权衡,而场景变量是指导致成像拍摄采样值不同的时间空间环境。匹配观测的间隔越大、场景表面反射率及放射光谱越不同,则场景变量对整体误差的贡献就越大^[22]。

场景变量的特征可以由成像仪进行图像配准时像素数目及位置的不同来表示,图像配准是使用 ROI 图片组进行交互定标的主要误差源。

3 交互定标方法分类论述

不同仪器数据的一致性来源于自身的定标,包括仪器的稳定性、完善的发射前定标以及发射后在轨定标。仪器间的交互定标将实验室发射前定标作为基础,利用普遍的光源或传递辐射计、地球表面靶场、月球和近似理想准恒定成像条件,或者使用来自第三方仪器的数据实现定标。结合表 1、表 2 和表 3 的内容,对不同交互定标方法归类总结,并进行对比论述。

3.1 SNOs 方法

在多个交互定标方法中,包括观测地球可视场地的卫星在内,天底点同时过境观测(SNO)方法在相似 SRF 的通道产生大约 1% 的比对不确定度^[6]。

3.2 SNO- x 方法

由于 SNO 方法只能在高纬度地区进行短时间的匹配数据采集,限制了观测目标和观测环境的选择,发展了 SNO- x 的方法进行仪器间交互定标。该方法利用沙漠场地的匹配偏差 3%,海洋场地匹配偏差 2%,不确定度均在 1%^[23]。

3.3 双重差异比较的方法

将交互定标算法建立在两仪器匹配测量的直接比较之上不常发生在可接受的阈值内,所以分别利用中间参考仪器的“双重差异”比较方法是可行的。实践中的常见传递标准包括中介传递仪器基准、地面场地替代定标基准和恒定靶场基准。

表 1 三类交互定标方法特性比较

Tab. 1 Comparing properties of three kinds of intercalibration approaches

	SNO	SNO- <i>x</i>	双重差异比较方法
原理介绍	利用两极附近极地卫星轨道交叉点同时观测数据并进行比较。	利用近轨道极地卫星在低纬度轨道近似平行的区域同时观测同地进行数据比较。	利用各仪器与中介参考仪器比对的 双重差异进行间接比较,从而对仪器间偏差进行定标。
方法特点	观测容易进行,可选择中间参考基准进行定标传递比较。对宽谱段范围非常有效(如太阳反射谱段,热放射及微波谱段范围)。要求精确定标的条件苛刻,精度较低。	与 SNO 相比,产生的数据量多,地形选择充分,发生频次高(2~3 天/次),时间阈值相对宽松,大气干扰低,可观测多种地物目标,辐射动态范围大,适用于 RSB 和红外波段。	利用中间基准,可以有效地扩大匹配阈值范围,适用于仪器间直接比较不能满足基本的匹配阈值要求的情形,是最具拓展性的交互定标方法。
应用难点	在不完全相同时间观测近似相同目标使仪器产生光谱匹配定标差异;不同的 SNO 发生点,拥有不同的靶场特性。要求精确定标的条件苛刻,精度较低;需要根据遥感器 SRF 和地球表面类型的不同进行修正补偿;	对同一地物目标的观测时间、角度需要统一,需要考虑表面 BRDF 特性和光谱差异造成的仪器偏差。	要求参考仪器在两次比较的环境下自身性能稳定且可定量标识。
解决途径	在不同时间、不同的照明/观看条件和不同的参考靶场下进行多次观测,综合比较数据,再根据遥感器 SRF 和地球表面类型的不同进行修正补偿	利用辅助的超光谱成像仪进行光谱偏差的测量修正,设计高精度数据匹配筛选算法是关键。	通过选择多样的中间基准以适应不同的定标条件,常见的有中介传递仪器基准、场地替代基准和恒定靶场。

1. 中介传递仪器基准:当比较来自不同时间或不同区域的卫星观测数据时,由于其所在轨道不能产生足够的匹配数据,可以经由中介参考仪器来进行双重差异比较。该方法通过中介参考量的测量来补偿比对条件范围下场景的不稳定,如图 2 所示,因此它需要传递仪器自身在数据比对期间保持稳定。

1)以地球同步轨道卫星(GEO)作为传递仪器:同步轨道卫星不间断地观测地球的一部分,允许极地轨道卫星(LEO)在 GEO 卫星视场内找到可匹配数据,因此 GEO 仪器可作为不同 LEO 卫星仪器的中介。与 SNO 方法对比,结果的平均差异小于 0.1 K^[18]。

2)航空器观测:该方法可以通过下探式探空仪在原地对大气轮廓进行测量取样。更先进的方法会利用与被监测卫星仪器相似的空载仪器,地基仪器和 RTM 一并扮演中间基准的角色向卫星上的被监测仪器传递空载参考仪器的定标。

3)NWP+RTMs:NWP 模型表示一个周期内大气外轮廓的表观状态,任何卫星和 NWP 模型之间会用一定的不确定度来表示相对误差。将观测数据与观测空间内的模型进行比较时,通过将 NWP+RTM 系统作为中间参考标准,比较卫星仪器和 NWP+RTM 的双重差异来传递定标,如图 3 所示。

表 2 采用不同中间参考仪器的双重差异比较方法的对比

Tab. 2 Comparing differences of double differencing approaches using different intermediate reference instruments

	中介传递仪器基准			地面场地基准	恒定靶场基准
	GEO	航空器	NWP 模型		
原理介绍	利用 GEO 对 LEO 交互定标, 即 GEO-LEO。	利用航空器仪器作为向卫星仪器传递定标的过渡参考基准。	以 NWP 模型 + RTMs 辐射传递模型为中间基准, 计算获得仪器间的偏差修正, 再应用于观测。	利用地面选定测试场地来估算遥感器光谱辐射。	利用恒定靶场进行重复的测量能够及时探测仪器衰减。
方法特点	LEO 在 GEO 视场内可找到匹配数据。	利用 RTM 预测仪器的观测结果, 再调整仪器定标实现一致连续性。目标表面和大气外轮廓的小变化可以被抵消。	利用建好的模型进行数据处理, 快速方便适用于多种定标, 但是参考基准定标会因 SRF 和模型操作误差引入整体系统误差 ^[24-25] 。	提供了高精度对地孔径定标, 定标可以在系统收集遥感数据的同时进行 ^[26] , 但是定标条件要求严格。	恒定靶场具有辐射特性稳定或特征变化可预测或近似理想靶场的特性, 用于对 VNIR 或 SWIR 光谱段仪器进行定标。
应用难点	GEO 比 LEO 的空间和光谱分辨率低, SRFs 差异会降低不同 GEO 平台的不同仪器比较精度。	RTM 的不确定度会引入到定标精度中。	要求 NWP 和 RTM 模型建立精度高且全面考虑多种变量进行偏差修正。	通过场地运动获得辐射增益过程昂贵, 限制了适用; 只有当系统掠过测试场时才能收集数据, 同时考虑天气条件影响, 实际定标数量小。	多数靶场并非完全恒定, 且该方法固有的限制是不能探测到靶场自身的变化。
解决途径	使用稳定性高的仪器, 并用 SBAF 对 SRFs 差异进行调整, 需注意由此引入的误差。	在环境条件稳定时, 利用地基仪器对大气特性进行精确测量, 再利用 RTM 预测定标。	目前适用对精度要求不是很高的极轨卫星交互定标上。	利用云层覆盖最小的仪器场地, 配合星载定标一起工作, 并多次重复定标。	由 RTM, 地基仪器, 参考辐射计等设备对靶场进行详细的特征描述, 并假设其在定标时段内或最近的特性描述起恒定。

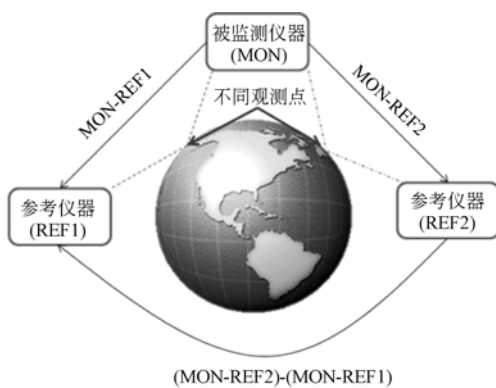


图 2 利用第三方卫星遥感器的双重差异比较法
Fig. 2 Using a third sensor to show how double differencing approach works

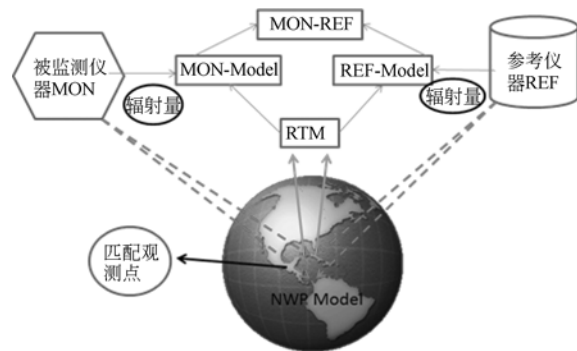


图 3 利用 NWP+RTM 模型进行两仪器双重差异比较
Fig. 3 Using NWP + RTM model to show how double differencing approach works

2. 基于地面的替代定标:“替代定标”是指所有不依赖于在轨系统的定标方法。利用地面测试场来估算遥感器光谱辐射,通过对其表面测量和辐射传递编码计算来实现。CEOS 建立了分布于全球的参考基准测试场来进行空间光学成像遥感器的替代定标,减轻溯源性和交叉比较的难度,对仪器飞行中的偏差进行评价。目前有 8 个仪器场地和 6 个准恒定定标场地(PICS)。

3. 恒定靶场:如果靶场由 RTM,地基仪器,

参考辐射计或一些联合的设备进行了足够的特性描述,则可以为仪器提供绝对定标或交互定标,图 4 所示为用于交互定标研究的多种靶场的图像。

1)PICS:最广泛使用的恒定靶场是 PICS,为典型的沙漠场地,被用于各种调查研究。PICS 由高反射率并由几乎没有植被的沙丘组成,因此 PICS 可以用来估算仪器的长期稳定性并方便多仪器间的交叉比对。

表 3 基于不同特性的恒定靶场交互定标方法比较

Tab.2 Comparison of intercalibration approaches of invariant targets with different characteristics

	辐射特性稳定的恒定靶场		特征变化可预测的恒定靶场			近似理想天体恒定靶场	
	PICS	DCC	瑞利散射	LWC	太阳闪光	月球	星体
方法特点	<p>是完美的太阳漫反射器^[28],可进行精确的带间定标和稳定的在轨监测。散射接近朗伯分布,降低了 BRDF 的要求。存在于 NIR 段的辐亮度定标。</p>		<p>可以作为绝对定标的参考量,减轻了不同仪器间交互定标的难度。与 PICS 和 DCC 比,适合低信号水平工作的仪器。</p>	<p>数量上充足,补充了大气层中端位置靶场。适合能获得云层详细特征量的定标。</p>	<p>相关气象卫星数量多,需考虑表面和大气对各波段的影响,可进行高效的带间定标。</p>	<p>月球表面反射率稳定^[13],自身引起的亮度变化可以用模型精确计算,用来监测仪器 RSB 谱段在轨稳定性。</p>	<p>所用探测器与 EO 仪器不同,不能对其定标,适用做成像导航和配准记录,不受信号强度影响。</p>
应用难点	<p>受到气溶胶,水汽,尘埃的大气吸收散射特性影响。</p>		<p>精度受到大气成分吸收散射影响。</p>	<p>LWC 辐亮度依赖其光学特性,用 NWP 计算精度不高。</p>	<p>该辐射中太阳成分很弱,计算反射率过程复杂。</p>	<p>受制于仪器的设计、操作条件及定标选时,并非所有仪器都能收集足够月球数据。</p>	<p>必须明确哪个探测器在哪个时间捕获了星体信号。</p>
解决途径	<p>利用一系列而非单个场地的数据。</p>		<p>选用副热带海洋大气下沉区靶场以减小悬浮颗粒和水体散射的影响,控制观看位置避免镜面反射,用 RTM 精确估算大气吸收影响。</p>	<p>从 MODIS 仪器获得云层光学厚度、高度、微粒半径和表面 BDRF 来估算 LWC 辐亮度。</p>	<p>在确定的闪光环境下即可预估太阳成分,需假设 SWIR 和 VIS 段的反射率比值恒定。</p>	<p>设计专业月球观测定标仪器,定时观测。</p>	<p>利用 3 轴稳定成像仪进行星体观测,并对地面程序优化来使其价值最大化。</p>

2) DCC:除了可选的陆地靶场,另一个稳定的靶场是深层对流云层(DCC)。DCC与PICS类似,反射率被假设为准恒定,DCC可采取与PICS同样的方法进行交互定标。DCC比起其他基于地球-表面的靶场,具有更高的反射率和辐射量。

3) 瑞利散射:另一种靶场是自身特性可预测的,即定标过程中信号变化可精确估算。在清洁的海面上,可见辐射是由气态分子对太阳光的散射造成的^[30],这被认为是瑞利散射。瑞利散射的定标精度在蓝光通道是3%,红光通道是2%。DCC和PICS靶场会使仪器过饱和,这两种方法经常配合使用。

4) LWCs:第二个变化且可预知的靶场是气态水云层(LWC)。由于单像元辐射是独立于周围像元辐射的假设会引入偏差,该方法精度在2%左右。

5) 太阳闪光:第三个可变可行的目标是覆盖太阳闪光范围的卫星测量。该方法采用太阳SWIR波段(如 $3.9\ \mu\text{m}$)的光谱辐照度,估算在长波红外通道(如 $12\ \mu\text{m}$)所获得的表面温度下产生的SWIR热放射减去测量所得的SWIR放射辐射,获得反射辐射,再从反射辐射和进入的太阳总辐射的比值中计算SWIR反射率,这种靶场适合于将可见范围内的绝对定标拓展至所有RSB,伴随1%~2%的精度^[31]。

6) 月球:第三种恒定靶场是天体,它对所有观测是恒定的,并提供独立于地球表面和大气的辐射基准,移除用地球靶场定标EO仪器的潜在问题。定标时,不同位置对月球的观测应在相同月相角内进行,其亮度差异可通过如ROLO模型^[32]修正,以此说明遥感器交互比对的SRF差异。

7) 星体:某些卫星仪器会有规律地观测一组选定的星体作为成像导航和配准记录。在静止轨道上,在一年中以不同时间观测这组星体。近期的工作^[33]证实了该类定标可达到与其他方法相当的精度。

4 国际合作

监测全球环境的活动可通过不同卫星平台上的多个设备所获得的覆盖几十年的历史数据间的协同合作来优化,需要将定标的相关偏差定量化以便数据之间能够等效合作。交互定标数据的国际合作可以进一步减轻应用难度,同时让研究者们更好地了解各自仪器定标间的偏差。

4.1 GSICS

GSICS由WMO和CGMS赞助,是GEOSS的关键部分^[6]。其目标是保证在不同时间、不同波段、由不同空间机构负责的不同仪器提供的卫星测量数据具备可比性,主要通过加强卫星仪器观测验证的交互定标方法来完成。GSICS发展了一套验证程序(如图1所示)来确保其交互定标产品具备可溯源性和一致性,该过程包括了监测仪器的表现,卫星仪器的交互定标,参考基准传递和基准测量以及存档数据的再定标。GSICS可以提供数据偏差监测,可在定标的过程中定量每个被监测仪器通道与参考基准的偏差,识别任意的变化趋势来决定是否进行定标修正。

4.2 CEOS

CEOS WGCV在提高卫星数据质量的发展中起到了重要的作用,它提升了数据的日常操作性,使得用户可以方便地研究全球数据表。WGCV的宗旨是确保EO数据及其产品质量精度的长期可信性,并提供Cal/Val信息交换及协调合作的平台。近些年CEOS举办的国际比对活动包括,利用Dome-C场地进行TOA光谱反射/辐射的比对活动^[34],利用Tuzgü场地进行地表反射率比对活动^[35]和在Miami进行的

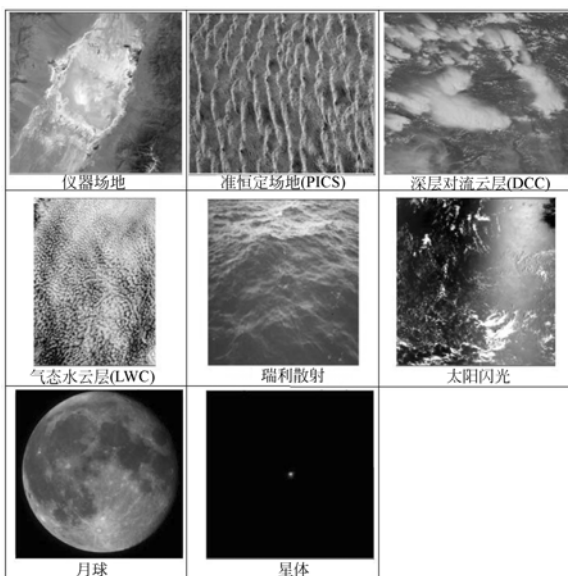


图4 用于交互定标的各个靶场图解

Fig. 4 Illustration of images of various targets for intercalibration

红外放射光谱比较活动^[36]。

5 总 结

交互定标技术应用领域的不断拓展以及实践活动的持续开展,改善了卫星仪器数据一致性,并对全球气候变化精确监测提供了强力支持。当前,国际机构正在协作整合资源来建立自动比对系统,需要将所有组织的所有仪器合并,卫星所有者和使用者需要有规律地获得参考场地的数据来研究其变化趋势,同时对相应的基础设施和工具进行长期连续地维护。卫星仪器间交互定标不仅是未来所有 Cal/Val 战略方案的核心,也是获得

仪器间相对偏差的唯一可实现方法,同时也是桥连因缺少飞行中公用仪器而引起的测量连续性预测数据缺失的方法。利用 EO 卫星进行监测活动的关键是在测量时间上保持一致性和连续性。许多气候系统的变化只会在利用一致性高、定标偏差可准确预测的精密仪器进行几十年甚至更多的观测之后才能展现。因此,随着更多的卫星观测被用来做科学应用和气候研究,用户对仪器间交互定标更青睐。像 CLARREO 和 TRUTHS 这样的气候监测项目的成功,将会依赖于卫星仪器间在轨交互定标技术的发展进步,像这样不断增长的应用已经使得交互定标成为了现在以及未来卫星仪器定标方案的主力。

参考文献:

- [1] LACHÉRADE S, FOUGNIE B, HENRY P, *et al.*. Cross-calibration over desert sites: Description, methodology and operational implementation [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2013, 51(3): 1098-1113.
- [2] CAO C, XIONG X, WU A, *et al.*. Assessing the consistency of AVHRR and MODIS L1B reflectance for generating fundamental climate data records [J]. *J. Geophys. Res. D, Atmos.*, 2008, 113(9): D09114-1-10.
- [3] WU A, XIONG X, CAO C. Terra and Aqua MODIS inter-comparison of three reflective solar bands using AVHRR onboard the NOAA-KLM satellites [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 2008, 29(7): 1997-2010.
- [4] MITTAZ J P D, HARRIS A R, SULLIVAN J T. A physical method for the calibration of the AVHRR/3 thermal IR channels Part I: The pre-launch calibration data [J]. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 2009, 26(5): 996-1019.
- [5] MADDY E S, KING T S, SUN H, *et al.*. Using Metop-A AVHRR clear-sky measurements to cloud-clear Metop-A IASI column radiances [J]. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 2011, 28(9): 1104-1116.
- [6] SHI L. Intersatellite differences of HIRS long wave channels between NOAA-14 and NOAA-15 and between NOAA-17 and METOP-A [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2013.
- [7] WU X, YU F. Correction for GOES imager spectral response function using GSICS. I: Theory [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2013, 51(3): 1215-1223.
- [8] YU F, WU X. Correction for GOES imager spectral response function using GSICS. II: Applications [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2013, 51(3): 1200-1214.
- [9] YU F, WU X, RAJA M K R V, *et al.*. Diurnal and scan angle variations in the calibration of GOES imager infrared channels [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2013.
- [10] HEWISON T J, WU X, YU F, *et al.*. GSICS intercalibration of infrared channels of geostationary imagers using Metop/IASI [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2013, 51(3): 1056-1080.
- [11] HEWISON T. An evaluation of the uncertainty of the GSICS SEVIRI-IASI intercalibration products [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2013, 51(3): 1171-1181.
- [12] CAO C, UPRETY S, XIONG J, *et al.*. Establishing the Antarctic Dome C community reference standard site towards consistent measurements from Earth observation satellites [J]. *Can. J. Remote Sens.*, 2010, 36(5): 498-513.
- [13] KIEFFER H H. Photometric stability of the lunar surface [J]. *Icarus*, 1997, 130(2): 323-327.
- [14] BUREAU. *International Vocabulary of Metrology-Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM) 3rd Edition* [M]. Int. des Poids et Mesures, Sèvres, France, JCGM/WG 2 Doc.

- N313, 2012.
- [15] SANDFORD S P, YOUNG D F, CORLISS J M, *et al.*. CLARREO: Cornerstone of the climate observing system measuring decadal change through accurate emitted infrared and reflected solar spectra and radio occultation [C]. *in Proc. SPIE Sensors, Syst., Next-Gen. Satellites XIV, Toulouse, 2010*:782-611.
- [16] FOX N, KAISER W A, SCHMUTZ W, *et al.*. Accurate radiometry from space: An essential tool for climate studies [J]. *Philos. Trans. Roy. Soc. London A, Math. Phys. Sci.*, 2011, 369(1953): 4028-4063.
- [17] GSICS Traceability Statement for IASI and AIRS [C]. *Darmstadt, Germany, EUM/MET/TEN/11/0157*, 2011.
- [18] WANG L, GOLDBERG M, WU X, *et al.*. Consistency assessment of atmospheric infrared sounder and infrared atmospheric sounding interferometer radiances: Double differences versus simultaneous nadir overpasses [J]. *J. Geophys. Res. D, Atmos.*, 2011, 116(11):D11111-1-11.
- [19] CHANDER G, MISHRA N, HELDER D L, *et al.*. Applications of Spectral Band Adjustment Factors (SBAF) for cross-calibration [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2013, 51(3):1267-1281.
- [20] DOELLING D R, LUKASHIN C, MINNIS P, *et al.*. Spectral reflectance corrections for satellite intercalibrations using SCIAMACHY data [J]. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2012, 9(1): 119-123.
- [21] PAGNUTTI M, BLONSKI S, CRAMER M, *et al.*. Targets, methods, and sites for assessing the in-flight spatial resolution of electro-optical data products [J]. *Can. J. Remote Sens.*, 2010, 36(5):583-601.
- [22] CHANDER G, HELDER D L, AARON D, *et al.*. Assessment of spectral, misregistration, and spatial uncertainties inherent in the cross-calibration study [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2013, 51(3):1282-1296.
- [23] UPRETY S, CAO C, XIONG X, *et al.*. Radiometric Intercomparison between Suomi-NPP VIIRS and Aqua MODIS Reflective Solar Bands Using Simultaneous Nadir Overpass in the Low Latitudes [J]. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 2013(30):2720-2736.
- [24] LIANG X, IGNATOV A. Monitoring of IR Clear-Sky Radiances over Oceans for SST (MICROS) [J]. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 2011, 28(10): 1228-1242.
- [25] SAUNDERS R W, BLACKMORE T, CANDY B, *et al.*. Monitoring satellite radiance biases using NWP models [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2013, 51(3):1124-1138.
- [26] THOME K, MARKHAM B, BARKER J, *et al.*. Radiometric calibration of Landsat [J]. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 1997, 63(7): 853-858.
- [27] COSNEFROY H, LEROY M, BRIOTTET X. Selection and characterization of Saharan and Arabian desert sites for the calibration of optical satellite sensors [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1996, 58(1):101-114.
- [28] FOUGNIE B, BACH R. Monitoring of radiometric sensitivity changes of space sensors using deep convective clouds: Operational application to PARASOL [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2009, 47(3):851-861.
- [29] SOHN B J, HAM S H, YANG P. Possibility of the visible-channel calibration using deep convective clouds overshooting the TTL [J]. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 2009, 48(11):2271-2283.
- [30] VERMOTE E, SANTER R, DESCHAMPS P Y, *et al.*. In-flight calibration of large field of view sensors at short wavelengths using Rayleigh scattering [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 1992, 13(18): 3409-3429.
- [31] HAGOLLE O, NICOLAS J M, FOUGNIE B, *et al.*. Absolute calibration of VEGETATION derived from an interband method based on the sun glint over ocean [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2004, 42(7):1472-1481.
- [32] KIEFFER H H, STONE T C. The spectral irradiance of the moon [J]. *Astron. J.*, 2005, 129(6): 2887-2901.
- [33] DEAN C, CHANG I L, LI Z, *et al.*. Recent advances in calibration of the GOES imager visible channel at NOAA [J]. *in Proc. SPIE Earth Observing Syst. XVII, San Diego*, 2012.
- [34] SIX D, FILY M, ALVAIN S, *et al.*. Surface characterisation of the Dome Concordia area (Antarctica) as a potential satellite calibration site, u-

- sing Spot 4/Vegetation instrument [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2004,89(1):83-94.
- [35] SLATER P N, BIGGAR S F, HOLM R G, *et al.*. Reflectance- and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1987, 22 (1):11-37.
- [36] BARTON I J, MINNETT P J, MAILLET K A, *et al.*. The Miami 2001 infrared radiometer calibration and intercomparison. Part II: Shipboard results [J]. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 2004,21 (2):268-283.
- [37] 李幼平,禹秉熙,王玉鹏,等. 成像光谱仪辐射定标影响量的测量链与不确定度[J]. *光学精密工程*, 2006,14(5): 822-828.
- LI Y P, YU B X, WANG Y P, *et al.*. Measurement chain of influence quantities and uncertainty of radiometric calibration for imaging spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(5):822-828. (in Chinese)
- [38] 徐娜,胡秀清,陈林,等. 2012. FY-2 静止卫星红外通道的高光谱交叉定标 [J]. *遥感学报*, 16(5): 939-952.
- XU N, HU X Q, CHEN L, *et al.*. 2012. Inter-calibration of infrared channels of FY-2/VISSR using high-spectral resolution sensors IASI and AIRS [J]. *Journal of Remote Sensing*, 16 (5): 939-952.

作者简介:



赵维宁(1989—),男,辽宁沈阳人,博士研究生,2011年浙江大学获学士学位,主要从事卫星仪器在轨太阳辐射绝对定标及光谱仪器设计的研究。E-mail: acgdream@126.com



王玉鹏(1972—),男,山东沂水人,博士,副研究员,主要从事空间遥感技术、精密太阳跟踪、太阳光谱及总辐射测量等方面的研究。E-mail: wangyp@ciomp.ac.cn



胡秀清(1974—),男,湖北人,博士,正研级高工。1996年获南京大学学士学位。2004年获北京师范大学硕士学位,主要研究方向:卫星光学遥感器的辐射定标,气溶胶、沙尘暴和大气可降水等大气参数的卫星反演算法研究,研发中分辨率光谱成像仪 L1 辐射定标业务算法。Email: huxq@cma.gov.cn



徐娜(1982—),女,山东烟台人,博士,副研究员。2010年毕业于中科院大气物理研究所获得大气物理学与大气环境理学博士学位。主要研究方向:辐射定标、云微物理特性和大气可降水等卫星遥感反演方法研究。Email: xuna@cma.gov.cn



方伟(1965—),女,辽宁锦州人,博士,研究员,1997年于中科院长春光机所获得硕士学位,2005年于中科院长春光机所获得博士学位,现为FY-3卫星太阳辐射监测仪主任设计师,主要从事太阳辐射计量研究。E-mail: Fangw@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)