

大视场偏振多光谱相机的在轨辐射定标研究进展

陈兴峰^{1,2}, 刘李^{3*}, 葛曙乐³, 李新⁴, 张凯南², 杨本永⁴

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100101
2. Finnish Meteorological Institute, Helsinki 00101, Finland
3. 中国资源卫星应用中心, 北京 100094
4. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 大视场偏振多光谱相机比传统的光谱相机多探测角度和偏振两个维度的信息, 尤其在气溶胶遥感监测领域, 具有很大优势, 所以在 2020 年前后全球将大量发射搭载该类载荷的卫星。作为量化程度很高的光学载荷, 在轨定标一直受到很大的重视。因受限于缺乏星上定标设备和低空间分辨率特点, 使用自然景物作为替代参考光源进行在轨辐射定标。多角度偏振相机内部的辐射传递过程复杂, 需要进行辐射定标的相机参数有多个。辐射定标系数包括辐射强度和偏振两种类型多个参数, 使用的自然景物类型多, 导致多种定标方法组合、并行发展。2018 年新发射的高分五号卫星是我国第一颗, 也是同期国际上唯一一搭载偏振运行载荷的卫星, 在其后国际上也会有多颗卫星搭载同类型传感器上天, 有必要梳理替代定标的研究进展情况。文章系统介绍了大视场偏振多光谱相机的一般光学结构及其光谱设置等重要技术参数, 梳理了相机的辐射传递模型。划分了绝对辐射强度、相对辐射强度和偏振参数三类来描述不同定标系数的在轨定标方法和原理。针对特定的待定标系数, 介绍了在轨替代定标所需选用的自然景物目标和定标的流程方法。形成了大视场偏振多光谱相机在轨辐射定标的方法系统。并汇总了定标结果检验的一般方法。新的大视场偏振多光谱相机的在轨辐射定标, 将继承原有研究基础, 使用特殊自然景物开展定标。在后续的同类遥感相机在轨定标工作中, 也可以充分借助同一个卫星平台上的其他载荷及其星上定标器、借助地面人工光源等方法开展新形式的在轨辐射定标。我国、欧洲以及美国等规划了新型偏振相机航天发射计划, 面向未来几年的我国和欧美诸多同类相机, 结合作者研究基础, 对未来在轨定标方法进行了初步设计和展望。偏振类型的多光谱相机主要服务于大气颗粒物遥感监测, 对我国当前关注的大气环境问题非常重要。卫星发射后持续的在轨辐射定标是保障卫星遥感产品反演精度的必要条件。系统的在轨定标研究梳理和在轨定标未来方法的初步设计将为后续卫星遥感应用系统提供方法和模型参考。

关键词 偏振相机; 多角度遥感; 在轨定标; 替代定标

中图分类号: TP73 **文献标识码:** R **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)02-0343-07

引言

行星大气横亘在航天遥感器和行星表面之间, 尤其是地球大气, 是对地光学定量遥感的重要研究问题。大气中的气溶胶自身对环境和全球变化有着重大影响, 同时通过与云的相互作用对气候产生影响。气溶胶是国内外大气遥感的一种重要研究目标。偏振是电磁波作为横波的一种特性。太阳发

出的光是非偏光, 在辐射传输过程中, 大气起偏能力较强, 而大部分地表起偏能力相对较弱。偏振探测有利于增强大气的信息而相对抑制地表信息。为了更准确获取更多气溶胶特征, 多角度、多光谱探测会增加求解未知数的更多输入信息。1996 年, 由法国国家空间研究中心 Centre national d'études spatiales (CNES) 支持, LILLE 大学大气光学实验室研制开发的 POLDER (Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances) 传感器, 搭载在日本的 Advanced

收稿日期: 2018-12-05, 修订日期: 2019-03-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0504800(2018YFB0504803)), 高分辨率对地观测系统重大专项项目(30-Y20A02-9003-17/18), 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室开放基金项目(2016JJ-3)资助

作者简介: 陈兴峰, 1984 年生, 中国科学院遥感与数字地球研究所副研究员 e-mail: chenxf@radi.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: liulicugb@126.com

Earth Observing Satellite 1 (ADEOS-1)卫星发射上天。POLDER 观测地气系统反射的多角度偏振太阳辐射,可以反演大气气溶胶和云的相关产品,服务于气候和全球变化研究。POLDER 传感器共三次被发射上天,因为 ADEOS-1 和 ADEOS-2 卫星故障,前两次在轨运行的时间都只有几个月,但是获取了大量有意义的对地观测多角度、多光谱、偏振遥感数据^[1],2004 年 12 月 8 日第三次搭载法国和美国合作的“卫星列车(A-Train)”计划中的 Polarization & Anisotropy of Reflectance for Atmospheric Sciences coupled with Observations from a Lidar (PARASOL),最终成功地长期在轨运行,肯定了 POLDER 传感器多光谱多角度偏振观测的独特优势^[2],形成了多角度偏振观测的理论和方法体系;2013 年 PARASOL 结束任务,之后尚无长期运行的大视场航天偏振遥感器^[3]。中科院遥感所和安光所开展了偏振遥感相机 Directional Polarized Camera (DPC)的航空预研工作,通过实验样机的设计^[4]、研制^[5]、定标^[3,6]、数据处理与反演、真实性检验等工作,全面论证 DPC 升级为航天版发射上天的可行性,通过航空遥感实验数据训练大气^[7]、地表^[8-9]、海洋等相关算法。

我国高分五号卫星(2018 年 5 月 9 日发射成功)搭载的 DPC,技术指标如表 1 所示,是与 POLDER 同类型的遥感器。通过滤光片和偏振片组合转轮来实现多光谱偏振观测,通过大视场沿轨重复拍摄可以在不同观测角度下多次拍到同一地面区域实现多角度观测。DPC 的结构和多角度拍摄模式如图 1 所示。

表 1 高分五号卫星多角度偏振相机技术指标

Table 1 Technical indexes of the Directional Polarized Camera onboard satellite Gaofen-5

指标名称	技术指标 (P 为偏振)
工作波段/nm	433~453 (443) 480~500 (490, P)
	555~575 (565) 660~680 (670, P)
	758~768 (763) 845~885 (865, P)
	745~785 (765) 900~920 (910)
工作模式	画幅式成像,转轮波段/偏振调谐
偏振解析	线偏振,三方向 0°, 60°, 120°
多角度观测	沿轨 9 个角度

后续,中国^[10]、欧洲^[11]、美国^[12]都有多个同类型航天遥感器发射计划,多角度、偏振、多光谱类型载荷的每个产品反演精度都强烈依赖于定标精度,发射后的持续在轨定标是必需的量化保障,也是整个地面处理和应用系统量化处理的第一步。我国陆地卫星定标缺乏此类传感器相关运行经验。

1 载荷辐射传递模型和定标系数

遥感传感器的定标是遥感反演量化的基础和首要工作^[13]。首先明确研究定标内容的含义:建立仪器测量值与已知标准参考值之间的关系。按照定标的内容可以分为光谱、辐射、几何三部分^[14]。光谱定标的内容是波段宽度、中心波

长、光谱响应函数等^[15];几何定标的内容是主距、像主点偏移量等内方位元素和畸变参数等^[16];而辐射定标则包含了辐射强度和偏振两部分。

POLDER 和 DPC 作为辐射定量化程度很高的载荷,持续的在轨定标尤为重要^[17],这类载荷的光学结构可以简化为图 2 所示的组成。

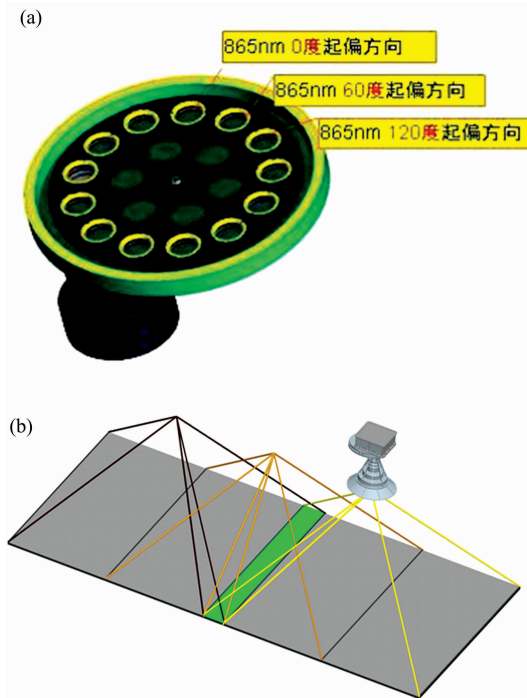


图 1 我国多角度偏振相机光机结构示意图 (a) 和多角度成像模式 (b)

Fig. 1 The Optical machine structure (a) and multi-angle imaging mode (b) of the Chinese Directional Polarized Camera

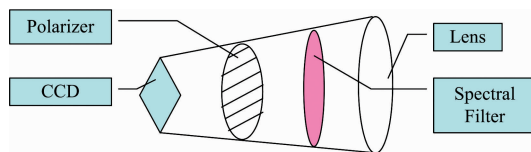


图 2 多角度偏振相机单个通道的光学结构简化图
Fig. 2 Schematic diagram of single channel of multi-angle polarized camera

光学传递过程经历 4 部分:镜头(lens)、滤光片(spectral filter)、偏振片(polarizer)、电耦合器件(CCD)共同影响入瞳光,最终在 CCD 上输出数码值(digital number, DN)。光的偏振态通常使用 Stokes 矢量(I, Q, U, V)来表示,其中 I 表示总辐射强度(遥感中可等同于辐亮度), Q 表示平行或垂直于参考平面的线偏振的强度, U 表示与参考平面成 45°角上的线偏振的强度, V 表示圆偏振强度。对地遥感中一般认为 $V=0$ ^[18]。多角度偏振相机的实际辐射传递模型^[19]可以表达为式(1)。

$$NDa = A_{\lambda} T_{\lambda, a} p g (p_{1(\theta)} + p_{2(\theta)} Q + p_{3(\theta)} U) + C \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} p_{1(\theta)} = 1 + \eta \epsilon_{(\theta)} \cos 2\alpha_a \\ p_{2(\theta)} = \epsilon_{(\theta)} + \eta \cos 2\alpha_a \\ p_{3(\theta)} = \eta \sin 2\alpha_a \end{cases} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中包含的参数描述了多角度偏振相机的特性,构成了待定系数的体系, DN_a 是某波段第 a 通道探测得到的 DN 值, C 是暗电流探测值(相机直接拍摄获取), α_a 偏振片检偏角度(是固定的数值):

A_a ,绝对辐射定标系数,该参数取决于相机的光学传递所有过程,每个波段的绝对辐射定标系数是一个单独的数值;

p ,空间响应低频分量,描述光学镜头在不同视场角 θ 下透过率不同而导致的图像中间像元较亮,边缘较暗的低频透过特性;

g ,空间响应高频分量,描述某波段第 a 通道的电耦合器件为主造成的单个探元(i, j)之间响应差异;

T_a ,相对第 2 检偏通道的透过率,该参数描述了同一波段不同检偏通道的偏振片-滤光片组合透过特性差异,其中 $a=1, 2, 3$,且 $T_2=1$;

$\epsilon_{(\theta)}$,光学镜头起偏度,描述光学镜头在不同视场角 θ 下对光线的起偏量,这是偏振相机作为一个光学仪器对待测量光线引入的偏振偏差;

η ,“偏振片的检偏程度”,这是本文给出的名称。该参数的描述在诸多文献中名称不一^[19-21]。但从公式中的作用来说,等于非偏光透过线偏振片后的偏振度数值。

上述 6 个待定标参数中,前 3 个可以归类为辐射强度类定标系数,后 3 个可以归类为偏振类定标系数。而在轨之后,仅利用自然目标进行替代定标,很难提供高于传感器偏振测量能力的参考基准,因此偏振类定标系数在轨替代定标并非全部具有很高精度。

2 在轨替代定标方法发展

目前认为利用搭载人工参考源的星上定标精度最高,而不具备星上定标条件的传感器普遍使用场地替代定标。但大视场的偏振光学遥感器在轨辐射定标却面临挑战。

挑战一:载荷没有星上定标器。一般来说旋转扫描型的遥感器在不必要成像的某些扫描范围(超出对地观测视场的部分)可以对准星上定标器工作,如 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)^[22]。偏振类型的扫描型传感器也可以使用星上定标,例如美国多次发射失败的 Aerosol Polarimetry Sensor (APS)^[23]和我国在研的偏振扫描仪^[24],而宽视场多角度的相机很难在星上配备星载定标参考源。所以卫星上天后只能采用自然的替代参考源进行定标^[21]。

挑战二:难以使用场地定标。POLDER 和 DPC 量化要求高,需要快速、省力的定标方法来保障高定标频次,场地定标较为费时费力,在人工测量的情况下定标频次不足。法国发展“La Crau”定标场也很早^[25],这类载荷具有很大的视场和刈幅,分光器件(滤光片)和检偏器件(滤光片)也会使

到达光电转换器的光被削弱^[26],且空间分辨率低,为 $7\text{ km} \times 6\text{ km}$ 。法国 La Crau 定标场只有 $15\text{ km} \times 10\text{ km}$ ^[25],不具备使用场地定标条件。我国用于气象、资源^[27]、高分^[28]、环境^[29]等系列卫星的敦煌定标场(如图 3),均一戈壁滩不足 $20\text{ km} \times 20\text{ km}$,边长仅对应 3 个 POLDER 像元,即使我国 DPC 分辨率提升(约为 3.5 km),也难以完成星地数据匹配。



图 3 敦煌遥感卫星辐射校正场(40.08°N, 94.4°E)

Fig. 3 The Dunhuang radiometric calibration site for satellite (40.08°N, 94.4°E)

挑战三:单一场地(场景)不适用于所有参数。辐射强度和偏振的多个定标系数,无法使用单一场地来完成定标,需要各种具有在特定条件下提供高精度辐射参考的多种自然场景来完成。

受限于以上原因,星上定标法和场地定标法难用于多角度偏振相机在轨定标。利用其他面积更大的、均一的自然景物作为替代参考光源的方法成为其主要在轨定标方法。

2.1 绝对辐射强度

绝对辐射定标系数 A 是整个光学相机在轨定标最重要的定标系数。鉴于 POLDER 的成功,后续同类型遥感器的发射计划较多,且沿用其定标策略。POLDER 引入了利用海洋场景定标的瑞利散射定标^[30]加太阳耀光传递定标^[31]方法等。“海洋瑞利散射”是相对较暗的目标,而太阳耀光是较亮的目标,这属于一个是低端响应而另一个是高端响应。事实上当前光电转换器件的线性度很好,例如我国 DPC 实验样机的各波段线性拟合系数 r-square 均在 0.997 以上^[6]。所以瑞利散射定标加太阳耀光传递定标方案被认为是适用于多角度偏振相机的,成为了 POLDER 业务化定标方法,同时通过时间序列定标监控遥感器在轨衰变规律^[32]。但在我国高分等卫星的地面处理系统业务化定标中,目前大都使用场地定标,瑞利散射、太阳耀光、云等自然景物定标方法在业务化中的实用,处于尝试阶段。

2.1.1 海洋场景瑞利散射

瑞利散射定标的基本原理是在一类洁净大洋水体上空,水体反射率极低,大气中气溶胶含量极少时,例如以 550 nm 处气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)小于 0.1 为条件,遥感器入瞳信号中瑞利散射的贡献最高可达 90%以上^[33]。瑞利散射定标是一种使用海洋场景进行的辐射定标

方法,最早由 Fraser 和 Kaufman 提出^[34],用于 Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES5 和 GOES6) Visible Infrared Spin-Scan Radiometers (VISSR)绝对辐射定标,精度达到 2%。Vermote 等^[35]将瑞利散射方法应用于 Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT)中心波长 450 和 550 nm 通道在轨定标,精度分别达到 3%和 5%。Hagolle 等^[32]将此应用于 POLDER 绝对辐射定标,Bruniuel 等^[36]用于 Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor (SeaWiFS),Fougnie 等^[37]用于 MODIS,海洋水色传感器定标精度约为 3%~4%。Chen 等^[38]专门安排陆地卫星 GF-1/WFV 拍摄海洋图像,将瑞利散射定标方法引入到高分辨率陆地卫星上面,并针对 22 个样本初步分析了太阳天顶角等引入误差的大小,最终定标精度优于 5%。瑞利散射定标的地表是采用水体的 Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)模型,具有适合多角度大视场相机定标的优势,但是需要输入大量的海洋大气参数,这些参数来自于其他卫星观测或者再分析资料^[39],需要严格的质量控制才能保障精度。顾名思义,瑞利散射定标在强瑞利散射情况下适用,所以定标的光谱范围为短波长波段(中心波长 670 nm 以下波段)。单点瑞利散射定标精度难以保障,多点定标和定标样本的严格筛选是必要的。

至于更长波长的近红外波段,采用太阳耀光波段间传递定标的方法,将短波长波段定标结果传递至 910 nm 等波段。

2.1.2 海洋场景太阳耀光

太阳耀光是遥感图像中的一种现象,不是固定海面目标,必须要满足镜面反射的几何条件,但在 MODIS 这种宽视场遥感器的数据中,就很容易观测到^[40],而在 POLDER、DPC 这种宽视场、面阵探测器加圆形视场、多角度高帧频重复拍摄的情况下,拍摄到太阳耀光是一种必然。太阳耀光在海洋表面的反射率光谱波段关系稳定,因此提供了波段之间传递定标的可能和便利。太阳耀光的反射率可以超过 1,甚至超过 10^[41],而云这种亮目标在非镜面反射情况下反射率最高为 0.7 左右,所以足够强烈的太阳耀光可以使遥感像元饱和,在耀光强度不致饱和的情况下,太阳耀光在表观信号中的贡献最大可以达到 90%以上^[33]。和瑞利散射定标一样,选择空气洁净的大洋水体,利用大尺度符合镜面反射的耀光像元,可以实现波段间传递定标。太阳耀光在海洋表面的 BRDF 模型是通过 Cox & Munk^[42-43]模型来描述的,矢量辐射传输计算时用到的大气参数也是来自于其他卫星观测。该方法已经成功地应用到了 MERIS^[33], MODIS^[40] 和 POLDER^[37]等多个传感器定标。实际的海洋表面光谱并不完全符合理想平静纯水的菲涅尔定律,定标时必须选择光谱相近的波段进行传递,减小波段间反射率关系偏差的影响。同时,耀光区域的云污染很难被直接发现,多角度数据的云判识可以剔除有云耀光像元。

2.1.3 云

同太阳耀光一样,云的反射光谱曲线也是很稳定的,Lafrance 等^[44]以 POLDER 传感器的 670 nm 波段为参考,传递标定了 443 和 490 nm,但是,云的选择对定标结果会带入很大的不确定性,使用高层云和低层云分别测试了,证明了

低层云定标不太稳定。所以通常选择在对流层顶的深对流云作为定标参考目标^[45]。

2.1.4 特殊波段的定标

从表 1 可以看出,多角度偏振相机为了统筹探测云高、水汽柱含量等重要的大气参数,含有氧气和水汽吸收通道,这些通道仍然可以通过太阳耀光或者云来进行定标,但需额外校正。涉及氧气吸收的 765 和 763 nm 波段,通过再分析资料获得海表气压推算氧气透过率予以校正^[32],910 nm 定标兼顾水汽柱含量和垂直分布造成的吸收校正^[46]。

2.2 相对辐射强度

空间响应低频分量 P 和空间响应高频分量 g 代表了相机内部不同像元(视场)之间的相对辐射差异。 P 的定标通常使用地表二向反射特性在公里级分辨率尺度较为稳定的沙漠定标方法来实现^[47], g 通过基于大数据量统计方法的云目标大量观测平均来实现^[21]。

从辐射强度定标的基本需求来说,较高精度的光学参考量获取的其他方法也可以实现相对辐射强度的定标,例如在绝对辐射定标中使用的瑞利散射定标和太阳耀光传递定标方法,针对不同视场角的多个定标结果,也可以完成 P 的定标。

2.3 偏振参数

遥感观测的偏振度耦合了地表和大气的联合起偏作用,在轨定标需要特殊景物的极端偏振特性来提供定标的光学参考。云目标在特定角度下具有零偏振的特点^[21],所以偏振参数中 T 可以通过云目标的通道间比值来完成, $\epsilon_{(g)}$ 也是使用云目标来完成不同视场角下对应的遥感器本身起偏度定标。 η ,综合多个文献描述,本文称之为“偏振片的检偏程度”,本身具有很高的精度,数值接近 1,且在长期变化很小^[21],很难实现现在轨替代方法定标。以上三个偏振相关参数,会共同影响遥感测量的偏振度,因此使用太阳耀光的偏振度可以对整个光学系统的偏振测量精度进行评价,实现偏振测量的传感器状态监控。根据仿真模拟,太阳耀光是镜面反射导致的,较强的辐射强度可以减小海上大气对表观偏振度计算带来的误差影响,是良好的偏振定标参考源。

目前来看,在轨替代方法较难实现入瞳光高精度偏振参考光源的获取,一般在地面处理系统中继续使用实验室定标系数,在有较大的稳定出现的定标系数变化量的情况下,才使用在轨替代定标的结果替换实验室定标结果。

3 未来定标新方法初步设计

2016 年 9 月,我国的天宫二号空间站发射上天,搭载多角度偏振相机该载荷主要测试工程系统,未介绍在轨定标^[48]。在未来几年里,我国在国家民用空间基础设施中规划的多颗卫星将搭载多角度偏振相机上天,例如“大气环境卫星”、“陆地碳卫星”等。而我国高分辨率对地观测系统重大科技专项第五颗卫星高分五号,现已发射并进行在轨测试,是最新的在轨大视场多角度偏振相机^[49]。欧洲气象卫星应用组织(European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, EUMETSAT)也计划 2021 年开始发射

欧洲第二代增强型的多角度偏振相机 3MI (Multi-Viewing-Channel-Polarisation Imager)^[50], 计划发射 3 颗。根据 EU-METSAT 和法国 LILLE 大学计划, 3MI 将继续使用瑞利散射和太阳耀光定标方法; 美国计划在 2021 年发射 Multi-Angle Imager for Aerosols (MAIA) 多角度偏振相机^[12]用于探测 PM_{2.5} 等大气污染状况。

3.1 新型偏振相机航天计划的传递定标方法

这些卫星存在搭载多颗传感器的情况, 多角度偏振相机缺乏星上定标器, 而同一颗卫星上的其他扫描型传感器具备星上定标功能, 在具备这种条件的情况下, 例如我国大气环境星的“偏振交火”载荷方案, 可以发展同卫星平台的“星上传递定标”^[10]。虽然定标计算的大部分过程类似于不同卫星的传感器之间交叉定标, 但因先天具备了同时、同观测角度、同太阳角度等优势, 传递定标的地物可以不局限于太阳耀光或者暗目标水体等极端条件, 可以在大面积均一的任何自然目标开展定标, “星上传递定标”无疑具有更多的机会和更高的精度。

3.2 地面人工源方法

基于几代偏振遥感研究经验和在光学定标方面的积累, 中科院安光所研究人员提出了基于地面人工源的方法开展高精度的辐射强度和偏振参数定标, 是一种新的在轨定标概念与方法, 其选址、设备建造、辐射传输计算、星地配合工作模式等都需要进行深入的研究, 已形成完善的高精度定标方法体系。

3.3 全自动海气参数观测的场地定标法

我国海洋卫星定标已经尝试了在钻井平台上部署海气参数同步测量仪器的方法^[51-52]。对于大视场偏振遥感器的在轨

替代定标可以考虑在中国南海的水质更为干净的区域部署专门化的长期自动观测平台, 为瑞利散射定标和太阳耀光传递定标提供更加精准的实测数据, 在不使用再分析资料的情况下, 每次星地同步观测都具备更高的定标精度, 形成稳定的场地替代定标业务化方法。这需要海洋卫星和其他卫星系列定标装备的联合设计和数据共享来实现。

4 结 论

多角度偏振相机在轨期间需要使用自然景物开展替代定标。即使拥有星上定标器, 替代定标作为一种独立的方法, 仍具有第三方质控监督的重要作用。如此众多的中外多角度偏振相机即将服务于地气系统的遥感探测, 其在轨定标应充分挖掘新卫星新载荷的特色, 发展具有更高精度的方法, 创新定标手段。在轨定标还有很多工作可以拓展, 例如在实验室定标比较容易实现的偏振片装配角度、温度对各波段的辐射响应影响系数、面阵 CCD 数据采集产生的帧转移效应等, 需要联合实验室定标经验、卫星平台的姿轨参数和环境参数等进行在轨定标方法研究。

当然, 光学遥感器的在轨替代定标发展经历几十年, 方法体系相对成熟, 在这种情况下, 也应该针对现有方法深化研究, 提出提高精度的新方法。尤其偏振相机作为新型遥感器列入多个航天计划^[53], 其在轨定标理论和方法体系将补充航天光学遥感定标领域短板, 通过模拟分析厘清误差规律, 通过研究优选方法、高精度过程质控方法和实验检验分析减小系统性和随机性误差, 使现有方法具有更好的精度和稳定性。

References

- [1] GU Xing-fa, CHEN Xing-feng, CHENG Tian-hai, et al(顾行发, 陈兴峰, 程天海, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2011, 60(7): 070702.
- [2] CHEN Hong-bin, FAN Xue-hua, HAN Zhi-gang(陈洪滨, 范学花, 韩志刚). Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用), 2006, 21(2): 83.
- [3] CHEN Li-gang, MENG Fan-gang, YUAN Yin-lin, et al(陈立刚, 孟凡刚, 袁银麟, 等). Journal of Atmospheric and Environmental Optics(大气与环境光学学报), 2010, 5(3): 227.
- [4] LUO Rui-zhi, QIAO Yan-li, HAO Pei-ming, et al(罗睿智, 乔延利, 郝沛明, 等). Chinese Journal of Quantum Electronics(量子电子学报), 2004, 21(3): 396.
- [5] QIAN Hong-hu, MENG Bing-huan, YUAN Yin-lin, et al(钱鸿鹤, 孟炳寰, 袁银麟, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2017, 66(10): 100701.
- [6] CHEN Li-gang, HONG Jin, QIAO Yan-li, et al(陈立刚, 洪津, 乔延利, 等). Opto-Electronic Engineering(光电工程), 2007, 34(9): 66.
- [7] Cheng T H, Gu X F, Xie D H, et al. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(7): 1643.
- [8] XIE Dong-hai, GU Xing-fa, CHENG Tian-hai, et al(谢东海, 顾行发, 程天海, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2012, 61(7): 452.
- [9] Xie D H, Gu X F, Cheng T H, et al. Science China Earth Sciences, 2011, 54(8): 1199.
- [10] LI Zheng-qiang, XU Hua, QIE Li-li, et al(李正强, 许华, 伽丽丽, 等). China Patent(中国专利), 104316440, 2016.
- [11] Marbach T, Phillips P, Lacan A, et al. Proceedings of SPIE, 2013, 8889: 888901.
- [12] Liu Y, David J D. Public Health Reports, 2017, 132(1): 14.
- [13] Gu X, Tian G, Li X, et al. Science in China Series E Engineering & Materials Science, 2005, 48(S1): 1.
- [14] Gong P. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(1): 16.
- [15] JIN Hui, JIANG Hui-lin, ZHENG Yu-quan, et al(金辉, 姜会林, 郑玉权, 等). Chinese Journal of Luminescence(发光学报), 2013, 34(2): 235.

- [16] CHEN Xing-feng, GU Xing-fa, GE Hui-bin, et al(陈兴峰, 顾行发, 葛慧斌, 等). Remote Sensing for Land & Resources(国土资源遥感), 2011, (1): 21.
- [17] Deschamps P Y, Bréon F M, Leroy M, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(3): 598.
- [18] Leroy M, Deuzé J L, Bréon F M, et al. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1997, 102(D14): 17023.
- [19] Bret-Dibat T, André Y, Laherrère J M et al. Proceedings of SPIE, 1995, 2553: 218.
- [20] YANG Bin, YAN Chang-xiang, ZHANG Jun-qiang, et al(杨斌, 颜昌翔, 张军强, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2017, 25(5): 1126.
- [21] Goloub P, Toubbe B, Herman M, et al. Proceedings of SPIE, 1996, 2957: 299.
- [22] Xiong X, Sun J, Xie X, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(1): 535.
- [23] Peralta R J, Nardell C, Cairns B, et al. Proceedings of SPIE, 2007, 6786: 67865L.
- [24] YANG Hong-chun, YANG Ben-yong, SONG Mao-xin, et al(杨洪春, 杨本永, 宋茂新, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2018, 45(11): 1110002.
- [25] WANG Min, ZHOU Shu-dao, HE Ming-yuan, et al(王敏, 周树道, 何明元, 等). Geomatics & Spatical Information Technology(测绘与空间地理信息), 2015, 38(7): 24.
- [26] YANG Wei-feng, HONG Jin, QIAO Yan-li(杨伟锋, 洪津, 乔延利). Acta Optica Sinica(光学学报), 2015, 35(8): 275.
- [27] LIU Li, FU Qiao-yan, PAN Zhi-qiang, et al(刘李, 傅俏燕, 潘志强, 等). Spacecraft Recovery & Remote Sensing(航天返回与遥感), 2016, 37(1): 89.
- [28] HAN Qi-jin, FU Qiao-yan, ZHANG Xue-wen, et al(韩启金, 傅俏燕, 张学文, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2014, 22(7): 1707.
- [29] GONG Hui, TIAN Guo-liang, YU Tao, et al(巩慧, 田国良, 余涛, 等). Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用), 2011, 26(5): 682.
- [30] ZHAO Wei, CHEN Guang-ming, NIU Sheng-li(赵巍, 陈光明, 牛生丽). Acta Oceanologica Sinica(海洋学报), 2013, 35(2): 52.
- [31] Hagolle O, Nicolas J M, Fournie B, et al. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2004, 42(7): 1472.
- [32] Hagolle O, Goloub P, Deschamps P Y, et al. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(3): 1550.
- [33] Frouin R. IOCCG Calibration Report, 2013.
- [34] Fraser R S, Kaufman Y J. Applied Optics, 1986, 25: 1177.
- [35] Vermote E, Santer R, Deschamps P Y, et al. International Journal of Remote Sensing, 1992, 13(18): 3409.
- [36] Bruniquel V, Fontanilles G, Bourg L, et al. Absolute Calibration of Seawifs Using Rayleigh Scattering. International Ocean Colour Science Meeting, 2013: 43.
- [37] Fournie B, Bracco G, Lafrance B, et al. Applied Optics, 2007, 46(22): 5435.
- [38] Chen X, Xing J, Liu L, et al. Remote Sensing, 2017, 9: 513.
- [39] Xue Y, Wen C, Yang X, et al. Climate Dynamics, 2017, 49(3): 843.
- [40] Fournie B, Lachérade S, Henry P, et al. MODIS-Aqua Calibration as Seen by Alternative Statistical Methods over Natural Tragetts, Conference on Characterization and Radiometric Calibration for Remote Sensing Logan, 2013. 11.
- [41] Su W, Charlock T P, Rutledge K. Applied Optics, 2002, 41(35): 7369.
- [42] Cox C, Munk W. Journal of Marine Research, 1954, 13(2): 198.
- [43] Cox C, Munk W. Journal of the Optical Society of America, 1954, 44(11): 838.
- [44] Lafrance B, Hagolle O, Bonnel B, et al. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2002, 40(1): 131.
- [45] Fournie B, Bach R. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2009, 47(3): 851.
- [46] Bouffies S, Bréon F M, Tanré D, et al. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(D3): 3831.
- [47] Cosnefroy H, Briottet X, Leroy M, et al. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(16): 3337.
- [48] YIN De-kui(殷德奎). Infrared(红外), 2019, 41(1): 1.
- [49] Li Z, Hou W, Hong J, et al. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 218: 21.
- [50] Marbach T, Riedi J, Lacan A, et al. Proc SPIE, 2015, 9613: 961310.
- [51] JIANG Xing-wei, LIN Ming-sen, ZHANG You-guang, et al(蒋兴伟, 林明森, 张有广, 等). Satellite Application(卫星应用), 2018, (5): 10.
- [52] GAO Fei, ZHU Jian-hua, YANG An-an, et al(高飞, 朱建华, 杨安安, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2013 33(s1): s101002.
- [53] YAN Lei, GU Xing-fa, CHU Jun-hao, et al(晏磊, 顾行发, 褚君浩, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2018, 22(6): 901.

Research Progress for In-Flight Calibration of the Large View Polarized Multispectral Camera

CHEN Xing-feng^{1,2}, LIU Li^{3*}, GE Shu-le³, LI Xin⁴, ZHANG Kai-nan², YANG Ben-yong⁴

1. State Environmental Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing Applications, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
2. Finnish Meteorological Institute, Helsinki 00101, Finland
3. China Centre for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China
4. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

Abstract The large view, polarized and multispectral camera detects the angular and polarized two more dimensional information than a traditional optical multi-spectral camera, and has great advances especially in aerosol remote sensing. So, near the year of 2020, a number of satellites loading multi-angle and polarized camera would be launched in different countries. As a high quantitative sensor, its in-flight calibration has always been attractive. Due to the lack of onboard calibration instrument and the low spatial resolution, the natural scenery targets are selected to be vicarious optic references for the calibration. Multi-angle polarized camera has several parameters to be calibrated. The radiometric calibration of polarized camera includes intensity and polarization parameters. Different calibration parameters are calibrated using many natural targets by many methods which are developed in parallel. The Gaofen-5 launched in 2018 is the first satellite loading polarized sensor of China, also the only operational satellite in the world this time. In view of many new polarized camera aerospace plans in European and American countries and China, the vicarious calibration for polarized camera is necessary to overview. In this paper, the optical structure and the spectral settings of the large view, polarized and multispectral camera are presented. The optical transfer model of camera is introduced. The in-flight calibration theory and method of each camera parameter is classified into three categories including absolute radiometric intensity, relative radiometric intensity and polarization. For a specified calibration coefficient, the natural target and calibration flow are introduced for the in-flight calibration. The method system is formed for the in-flight radiometric calibration of the large view, polarized and multispectral camera. Also, the general validation methods of calibration are concluded. The in-flight calibration of the new large view, polarized and multispectral camera will inherit the original research and use special natural scenery to carry out calibration. In the same kind of future remote sensing camera, new style in-flight radiometric calibration will be based on the instruments and its calibrator onboard the same satellite platform, ground-based artificial optical source and others. China, Europe and America have planned some future polarized camera, jointly considering the research basis of authors, preliminary design and prospects for the future on-orbit calibration method are given. A polarized multispectral camera mainly serves the remote sensing monitoring of atmospheric particulate matter, which is very important for the atmospheric environment problems currently concerned in China. A continuous in-flight calibration can ensure the accuracy of satellite remote sensing retrieved products. This overview of in-flight calibration research and the preliminary design for the future calibration method will provide method and model references for the remote sensing application system of the planned satellite.

Keywords Polarized camera; Multi-angle remote sensing; In-flight calibration; Vicarious calibration

(Received Dec. 5, 2018; accepted Mar. 19, 2019)

* Corresponding author