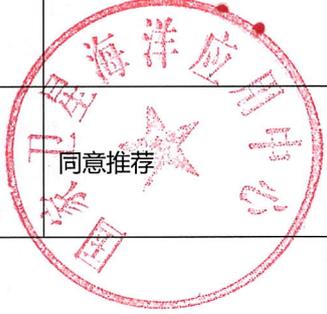


自然资源标准项目建议书

中文名称	海洋水色卫星光学传感器星上辐射定标技术规范					
英文名称	Onboard radiometric calibration for ocean color satellite optical sensors					
标准层级	<input type="checkbox"/> 国家标准 <input checked="" type="checkbox"/> 行业标准		标准性质		<input checked="" type="checkbox"/> 推荐性标准 <input type="checkbox"/> 标准化指导性技术文件 <input type="checkbox"/> 强制性标准	
标准类型	<input type="checkbox"/> 环保 <input checked="" type="checkbox"/> 方法 <input type="checkbox"/> 产品 <input type="checkbox"/> 安全 <input type="checkbox"/> 管理 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/> 基础 <input type="checkbox"/> 卫生					
制定/修订	<input checked="" type="checkbox"/> 制定 <input type="checkbox"/> 修订		被修订标准号			
采用国际标准	<input checked="" type="checkbox"/> 无 <input type="checkbox"/> ISO 确认的国际标准 <input type="checkbox"/> ISO <input type="checkbox"/> ISO/IEC <input type="checkbox"/> IEC <input type="checkbox"/> ITU		采用程度		<input type="checkbox"/> 修改 <input type="checkbox"/> 等同 <input type="checkbox"/> 非等效	
采标号			采标名称			
ICS	07.060		CCS		A45	
技术归口单位	卫星应用 (TC230SC3)					
牵头起草单位	国家卫星海洋应用中心					
参加起草单位	中国海洋大学、中国海洋大学三亚海洋研究院					
联系人	姓名	彭海龙	职务	室主任	电话	010-62105667
	电话	13241420095	邮箱	phl@mail.nsoas.org.cn		
	所在单位	国家卫星海洋应用中心				
项目周期	24个月	是否采用快速程序	<input type="checkbox"/> 是 <input checked="" type="checkbox"/> 否	快速程序代码	<input type="checkbox"/> B2 <input type="checkbox"/> C3 <input type="checkbox"/> B3 <input type="checkbox"/> B4 <input type="checkbox"/> B1	
目的、意义	近年来我国海洋水色卫星快速发展，为了满足水色卫星定量化应用需求，提高卫星产品数据质量，需要通过星上辐射定标技术对传感器辐射响应随时间的变化进行校正，通过制定本标准，有利于提高我国业务化海洋卫星水色遥感器的辐射定标精度，进一步拓展我国海洋水色卫星产品的应用潜力。					
范围和主要内容	<p>本规范阐明了海洋水色卫星光学传感器在轨运行期间星上辐射定标的一般规定和主要定标数据处理规定，用于指导和规范海洋水色卫星光学传感器在轨辐射定标业务工作。</p> <p>本规范适用于多光谱和高光谱海洋水色卫星光学传感器太阳反射波段的星上辐射定标过程，可用于提高国产/非国产光学传感器的在轨辐射定标精度。本规范解释了有关名词术语，说明了星上辐射定标的基本流程，详细介绍了其主要步骤中对数据的处理过程，包括数据质量控制方法、关键参数计算方法以及定标结果的推导计算公式。主要及内容包括：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 星上辐射定标过程中的常用名词和术语的定义与描述； 2) 卫星发射前定标的规定和参数要求，以及在海洋水色卫星光学传感器辐射定标过程中的参数配置规范； 3) 海洋水色卫星光学传感器星上辐射定标过程中的定标频次要求以及数据处理基本流程的规范； 					

	4) 星上辐射定标过程中对定标系统和光学传感器的条件限制与误差的要求; 5) 星上辐射定标过程中数据质量控制的要求; 6) 星上辐射定标的过程中观测数据的时空匹配方法规范; 7) 规范了获得星上定标系数的详细过程, 包括: 入射太阳光的衰减、日地距离校正、双向反射分布函数衰减校正、漫反射板辐亮度计算和星上绝对辐射定标系数的计算。		
国内外情况简要说明	本标准是结合国外公开发表的相关论文, 结合我国自主海洋水色卫星辐射定标业务的实际情况制定, 适合我国海洋水色卫星定标需求, 可操作性强。本标准没有涉及到国内外相关专利。		
有关法律法规和强制性标准的关系	本标准与现行的法律、法规和标准无冲突。		
经费预算说明	该项目经费预算为 3 万元。经费由国家卫星海洋应用中心统筹解决, 已落实。其中, 会议费 0.5 万元, 专家咨询费 1.5 万元, 劳务费 0.6 万元, 出版费 0.4 万元。		
时间进度安排	2023 年 6-10 月, 完成单位内部审查, 修改完善形成标准征求意见稿; 2023 年 11-12 月, 完成标准的意见征求, 按征求意见稿进行修改完善; 2024 年 1-5 月, 完成标准送审稿, 组织专家对标准进行第一轮审查, 修改完善, 并完成标准编制说明; 2024 年 6-9 月, 完成标注说明和征求意见稿汇总处理表, 上报完善稿, 继续修改完善; 2024 年 10 月-2025 年 2 月, 开展第二轮标准审查, 修改完善; 2025 年 3-6 月, 完成标准报批稿, 完善编制说明和意见汇总处理表, 完成提交可发布标准终稿。		
标准涉及的产品清单	无。		
是否有国家级科研项目支撑	<input checked="" type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否	科研项目编号及名称	
是否涉及专利	<input type="checkbox"/> 是 <input checked="" type="checkbox"/> 否	专利号及名称	
是否由行标/地标/团标转化	<input type="checkbox"/> 是 <input checked="" type="checkbox"/> 否	转化标准号及名称	
是否属于军民通用的标准项目	<input type="checkbox"/> 是 <input checked="" type="checkbox"/> 否	协调情况	
牵头起草单位意见 (加盖公章)	 同意申报	推荐单位意见 (加盖公章)	 同意推荐
备注			



中华人民共和国测绘行业标准

HY/T XXXXX—202X

海洋水色卫星光学传感器
星上辐射定标技术规范

Onboard radiometric calibration for ocean color satellite optical sensors

(草案)

202X - XX - XX 发布

202X - XX - XX 实施

中华人民共和国自然资源部 发布

目 次

目次.....	1
前言.....	2
海洋水色卫星光学传感器星上辐射定标技术规范.....	3
1 范围.....	3
2 规范性引用文件.....	3
3 术语与定义.....	3
3.1 水色传感器.....	3
3.2 空间分辨率.....	3
3.3 观测几何.....	3
3.4 DN 值.....	4
3.5 发射前定标.....	4
3.6 星上定标.....	4
3.7 太阳定标.....	4
3.8 绝对辐射定标系数.....	4
3.9 光谱响应函数.....	4
3.10 双向反射分布函数.....	4
3.11 太阳漫反射板.....	5
3.12 太阳衰减屏.....	5
3.13 太阳漫反射板稳定性监测器.....	5
4 一般规定.....	6
4.1 发射前定标.....	6
4.2 参数配置.....	6
4.3 太阳定标频次要求.....	6
4.4 数据处理基本流程.....	7
4.5 条件限制与误差.....	8
5 太阳定标数据处理规定.....	9
5.1 数据质量控制.....	9
5.2 数据时空匹配方法.....	9
5.3 衰减入射的太阳光.....	10
5.4 日地距离校正.....	10
5.5 双向反射分布函数的衰减校正.....	10
5.6 漫反射板辐亮度计算.....	11
5.7 计算星上绝对辐射定标系数.....	12
参考文献.....	14

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中华人民共和国自然资源部提出。

本文件由全国地理信息标准化技术委员会卫星应用分技术委员会(SAC/TC230/SC3)归口。

本文件起草单位：国家卫星海洋应用中心、中国海洋大学和中国海洋大学三亚海洋研究院。

本文件主要起草人：彭海龙、陈树果、宋庆君、胡连波、张亭禄、周武、穆博、杨晟、张宇飞、腾和丽。

海洋水色卫星光学传感器星上辐射定标技术规范

1 范围

本文件确立了海洋水色卫星光学传感器星上辐射定标的基本要求和太阳定标数据处理要求,规定了哪些内容。

本文件适用于海洋水色卫星光学传感器太阳反射波段的星上辐射定标。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注明日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准。凡是不注明日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB/T 3102.6-1993 光及有关电磁辐射的量和单位。

3 术语与定义

下列术语与定义适用于本标准。

3.1 水色传感器

一种被动式光学传感器,接收大气路径散射、水面反射和水体离水辐射的辐射信息,进行大气校正可以得到水体离水辐亮度,通过生物反演算法可以得到叶绿素、无机悬浮物和有机黄色物质的分布信息。

3.2 空间分辨率

又称为地面分辨率,是描述传感器所能观测到的最小目标大小的一种性能参数,指可以识别的最小地面距离或最小目标的大小,而空间分辨率是针对传感器或图像而言的,指图像上能够详细区分的最小单位的尺寸或者大小,或指传感器区分两个目标的最小角度或线形距离的度量。

3.3 观测几何

指包括太阳天顶角、太阳方位角、传感器观测天顶角与传感器观测方位角在内的角度。

3.4 DN 值

指水色传感器对入瞳处辐射响应的数码值。

3.5 发射前定标

指水色传感器在发射之前，通过实验室或野外实验，使用标准光源等计量器具，获取传感器定标参数的过程。

3.6 星上定标

指在卫星发射后的在轨运行期间，通过安装在卫星平台上的定标装置来实现对星载传感器的辐射定标。星上定标依据其选择的辐射定标源的不同，分为内置灯定标、月亮定标和太阳定标。

3.7 太阳定标

指一种主要的星上辐射定标技术，其是以在一个太阳周期内具有高度稳定性的太阳作为参考定标源，通过太阳漫反射板等星上定标设备将太阳辐射引入到传感器入瞳处，从而可以计算得到传感器定标系数并实现对传感器在轨绝对辐射定标的方法。

3.8 绝对辐射定标系数

指通过绝对辐射定标方法得到的可以将水色传感器 DN 值转换为辐亮度的系数。

3.9 光谱响应函数

指传感器每个波段的光谱响应特性，一般是归一化光谱响应函数，可以用作谱段的密度函数来估计谱段的辐射亮度期望，辐射定标需要考虑传感器光谱响应函数的影响。

3.10 双向反射分布函数

双向反射分布函数（BRDF）是用来定义给定入射方向上的辐射照度如何影响给定出射方向上的辐射率。它描述了入射光线经过某个表面反射后如何在各个出射方向上分布这可以从理想镜面反射到漫反射、各向同性或者各向异性的各种反射。BRDF 是一个定义光线在不透明表面反射的四次元函数，单位为 sr^{-1} ，其中，sr 是球面度的单位。

3.11 太阳漫反射板

是太阳定标方法的核心，它的主要工作是通过反射衰减后的太阳光对待定标的传感器进行绝对辐射定标。通常需要在发射前的实验室中预先测量此太阳漫反射板在不同入射角度（包括天顶角和方位角）下的 BRDF。

3.12 太阳衰减屏

太阳衰减屏用来对入射的太阳光强度进行衰减。这是由于水色传感器的观测对象通常为具有较低辐射亮度的海洋目标，所以需要入射光进行衰减来匹配传感器在工作时的一般能量强度，同时，通过对入射太阳光进行衰减也有助于减缓太阳漫反射板的性能退化，从而降低不确定度。

太阳衰减屏通常为多孔纯机械结构件，主要通过单元的通光孔占比实现对入射能量的衰减。由于衰减屏在几何上并非理想状态零件，存在孔大小、孔距不绝对一致以及通光孔壁厚不为 0 的特点，其透光量随照明角度变化会有差异。通常需要在发射前的实验室中预先测量此太阳衰减屏在不同入射角度（包括天顶角和方位角）下的光透过率。

3.13 太阳漫反射板稳定性监测器

由于太阳漫射板在受到持续的太阳照射后，其 BRDF 会不断退化，所以通常会采用一些措施来保证较低的不确定度的要求，即设置一个太阳漫反射板稳定性监测器来监测定标漫反射板性能的退化情况。

目前国际上通常使用另外一块太阳漫反射板（即参考漫反射板）或比辐射计作为稳定性监测器。其中，参考漫反射板采用的是与被监测的太阳漫反射板相同的材料和加工工艺，具有近乎相同的光学性能。相比之下，参考漫反射板的使用频率相对较低，所以它可以作为参考标准，用于长期监测和校正太阳漫反射板的性能衰减。而比辐射计则是通过进行比对测量来监测太阳漫反射板反射性能的在轨变化情况。

4 基本要求

4.1 发射前定标

海洋水色卫星光学传感器辐射定标中，发射前定标应当充分表征水色传感器的各项性能指标，提供一系列的必须参数，包括绝对辐射定标系数、偏振响应以及像元间的相对定标系数等。

4.2 参数配置

在海洋水色卫星光学传感器辐射定标中，待定标的海洋水色卫星数据应该符合如下数据产品规范：

数据产品中必须包括发射前定标参数、观测时间、观测几何、漫反射板 BRDF 参数等，所需具体的输入参数与辅助数据如下：

(1) 输入参数

- 地外太阳光谱辐照度；
- 成像时间；
- 成像几何参数：
 - ◇ 太阳天顶角、方位角
 - ◇ 卫星位置、速度
 - ◇ 卫星姿态
- 定标系统安装矩阵；
- 待定标传感器光谱响应函数；
- 待定标传感器实验室测量的特征光谱；
- 待定标传感器的 L1A 级数据产品。

(2) 辅助数据

- 太阳衰减屏透过率的查找表；
- 太阳漫反射板 BRDF 的查找表；
- 参考漫反射板 BRDF 的查找表；

4.3 太阳定标频次要求

海洋水色卫星光学传感器星上辐射定标的太阳定标方法使用太阳漫反射板（待定标的漫反射板）、太阳漫反射板稳定性监测器（参考漫反射板或比辐射计）和波长定标板等装置，太阳定标采用的定标周期及频次应符合如下规范：

- a) 对于使用太阳漫反射板的定标，需要进行长期的、高频次的定标，建议保持在至少每天一次，通过采集水色传感器对太阳漫反射板的观测数据，以实现对待定标传感器的连续性太阳定标，保证传感器自身的在轨辐射定标精度和稳定性；
- b) 对于使用太阳漫反射板稳定性监测器来监测太阳漫反射板的性能变化情况，需要通过降低其使用频次来保证其稳定性，减小衰减程度，建议保持在每月一次，通过依次采集水色传感器对参考漫反射板的观测数据或比辐射计观测得到的对比数据，以对太阳漫反射板在轨运行稳定性进行监测并进一步对其BRDF的衰减进行校正；
- c) 对于使用波长定标板进行的水色传感器波长定标，同太阳漫反射板稳定性监测器的定标一样，建议保持在每月一次，通过依次采集波长定标板和太阳漫反射板的数据，以实现对待定标传感器在轨运行时中心波长位置的校正；
- d) 若卫星的星上定标系统中存在可以在同一轨内完成对太阳漫反射板、太阳漫反射板稳定性监测器和波长定标板进行数据采集的连续旋转模式，则建议每月进行一次连续旋转定标，同时完成传感器波长定标和太阳漫反射板的性能衰减校正，在轨时可根据需要进行选择，期间可对各设备进行多次的数据采集。

4.4 数据处理基本流程

计算太阳定标系数的具体流程如下：

- a) 卫星发射前，在地面实验室测量中获得各漫反射板组件的 BRDF 数据，根据在轨后进行太阳定标的入射角度（天顶角和方位角）范围建立不同入射角和辐射出射方向的漫反射板辐射模型，并与实验室定标数据相结合建立发射前地面辐射定标模型；
- b) 卫星发射前，在地面实验室测量中获得太阳衰减屏在不同入射角度（天顶角和方位角）下的透过率；
- c) 卫星发射后，对于以太阳为定标源的星上辐射定标，在引入太阳光照射的过程中，通过太阳衰减屏对太阳辐射进行衰减，以匹配水色传感器在工作时的一般能量水平；

- d) 在一次完整的太阳定标过程中，依次使用衰减过后的太阳光照射太阳漫反射板和太阳漫反射板稳定性监测器，二者交替观测，在获取漫反射板定标数据的同时，通过对稳定性监测器的数据获取，实现了对太阳定标时刻太阳漫反射板双向反射分布函数（BRDF）的实时校正；
- e) 使用经过 BRDF 校正后的太阳漫反射板观测数据来计算实际的等效入瞳辐亮度；
- f) 通过观测得到的 DN 值和实际的等效入瞳辐亮度来计算待定标传感器的太阳定标系数，建立星上辐射定标模型，即建立起待定标传感器自身的太阳定标与对地观测之间的转换关系；
- g) 通过定期获取的在轨波长定标数据，和稳定性监测器比对数据对星上定标模型进行不断修正，对对地观测下获得的数据进行标定。

4.5 条件限制与误差

为能准确确定进入后续光学系统的辐射值，对定标系统和待定标传感器的主要要求如下：

- (1) 一年四季都能接受到太阳辐射；
- (2) 太阳漫反射板输出的辐亮度要稳定，并且在一年四季中太阳对卫星照射角不同的情况下，太阳漫反射板输出的辐亮度一致；
- (3) 太阳漫反射板工作稳定、可靠和长寿命等；
- (4) 太阳辐射能以全孔径、全视场和端到端的方式通过传感器的成像系统，均匀照明探测器焦平面内的所有像元；
- (5) 太阳漫反射板输出的辐亮度与地景辐亮度相匹配，即定标工作点要在传感器响应动态范围内的适当点上；
- (6) 为了使定标时，由大气和地景所引起的信号影响减至到最小，太阳定标选在卫星刚刚飞出地球的阴影区，星下点大气也处在阴影区，而太阳光恰好照射到卫星上的太阳漫反射板时进行。

星上辐射定标技术会存在一些可预期的误差，目前所发的误差来源主要有以下几方面：

- (1) 定标源输入信号的不确定度：定标源输入信号的不确定度包括两部分，分别是太阳直射光谱数据的不确定度以及杂散光引入的不确定度。一般来说太阳直射光谱数据的不确定度值是已知的，被认为是 0.2%（Robert et al. 2013）。杂散光引入的不确定度与仪器定标的时间、位置等因素相关，约为 0.5%。
- (2) 漫射板 BRDF 的不确定度：漫射板 BRDF 的不确定度包括其发射前本身存在的和在发射后进行星上定标期间产生的。其中，发射前本身存在的的不确定度包括实验室定标中漫射板 BRDF 测量的不确定度，约为 1%，漫射板自身的非均匀性引起的的不确定度，约为 1%；星上定标期间产生的不确定度包括

漫射板稳定性监视器的响应变化引起的不确定度，约为 0.5%，以及衰减屏透过率变化引入的不确定度，约为 0.3%。

(3) 角度偏差的不确定度：角度偏差的不确定度主要包括：卫星姿态的测量精度，主要影响太阳入射天顶角 θ_{sun} ，同时由于太阳衰减屏固定在卫星上，与卫星的相对姿态保持恒定，因此在衰减屏透过率中的角度影响也反映在其中；漫反射板方向与卫星坐标的匹配精度，通过进行漫反射板方向与卫星坐标的匹配，可确定定标源相对于漫反射板的入射角，因此匹配精度直接影响使用的漫反射板 *BRDF* 值的准确性；旋转望远设备与半角镜在观测各个量时的角度精度，这一精度直接决定进行星上定标与观测地物时是否是在使用同样的后续光学系统。角度偏差的不确定度小于 1%。

星上辐射定标的总体不确定度为：

$$\sigma = \sqrt{\sum_i \sigma_i^2} \quad (1)$$

总不确定度在可见光和近红外波段需要保持在 2% 以内，在紫外波段需要保持在 3% 以内，在短波红外波段需要保持在 3% 以内。

5 太阳定标数据处理要求

5.1 数据质量控制

太阳定标中传感器依次对地物、太阳漫反射板、太阳漫反射板稳定性监测器、波长定标板和深冷空间（或采集暗电流的空板）进行观测采集数据，针对这些观测数据需要进行质量控制，质量控制方式描述如下：

- a) 传感器通过对各漫反射板的观测，积累了不同的观测数据，需要判断其阈值范围和稳定性将异常值剔除；
- b) 定标过程的前后分别采集两组暗电流的数据，并在平均后从总的观测结果中去除，以减小由于设备噪声所产生的误差；
- c) 对于一次完整的太阳定标过程，提供短时间内的多组观测结果，综合多个结果获得稳定且质量较好的定标结果，避免由于异常数据所产生的异常结果。

5.2 数据时空匹配方法

本标准对于太阳定标数据的时空匹配,主要是指进行星上太阳定标的时机选择和不同漫反射板进行太阳定标时观测几何的情况。

- a) 在进行星上太阳定标时机选择时,主要考虑待定标传感器太阳入射角度的变化情况,同时还要满足对太阳定标时星下点在阴影区内,保证地面杂散光对太阳定标的影响降至最低。为尽量减少杂散光的影响,一般在两极的晨昏交界线处进行太阳定标。当卫星飞过晨昏交界线处时,卫星已飞出阴影区,而星下点位置还在阴影区内,这样可以保证在卫星可以探测到太阳的同时,杂散光最小;
- b) 太阳漫反射板和太阳漫反射板稳定性监测器在分别对太阳进行观测以实现对其的BRDF衰减校正时,二者应分别处于非常接近的入射角度下,从而尽可能地减小了由于BRDF的各向异性衰减所造成的不同所产生的校正误差,在一定程度上尽可能地避免对太阳漫反射板的错误校正。

5.3 衰减入射的太阳光

使用太阳衰减屏对入射的太阳光进行衰减,随后此衰减光由一定的入射天顶角和方位角照射在太阳漫反射板上,从而被进一步的反射并由待定标传感器接收。在已知入射到太阳衰减屏上太阳天顶角和方位角的情况下,可以根据在发射前实验室中获得的查找表得到对应角度下太阳衰减屏的透过率(τ),并将此透过率用于星上定标系数的计算过程中。

5.4 日地距离校正

根据卫星在定标时刻的实时位置可以计算出日地距离,与一整年的平均日地距离进行比较便可以获得日地距离校正因子 d_{ES} 。下式中的 E_S 便是经过日地距离校正后的特定距离下的地外太阳辐照度,公示如下:

$$E_S(\lambda) = E_0(\lambda)/d_{ES}^2 \quad (2)$$

其中, E_0 是平均日地距离下的地外太阳辐照度(来自于 Thuillier 等人,其平均绝对不确定性在可见光波段约为 1%)

5.5 双向反射分布函数的衰减校正

太阳漫反射板反射率在空间环境中随时间会发生衰减，需要对其进行监测并校正，以此确保传感器在全寿命期内的太阳定标精度。太阳定标系统中通常采用两种方法来对太阳漫反射板的衰减进行校正，其一为采用一块与太阳漫反射板材料相同、工艺相同的参考漫反射板通过比对测量的方法来实现对太阳漫反射板的稳定性监测与校正，太阳漫反射板与其参考漫反射板在相同环境中使用，衰减规律相同，仅由于使用频次不同，而导致衰减程度不同。根据在轨定标频次以及每次使用时的曝光时间估算，全寿命期内参考漫反射板的总曝光时间最好不要超过 2 小时，在该曝光时间水平上参考漫反射板的衰减可以忽略；其二为采用一个比辐射计作为对定标漫反射板稳定性的监视器，在工作时，比辐射计分别交替观测入射的直射太阳光和太阳漫反射板反射的太阳光，并通过对观测值的比较来监测跟踪定标漫反射板 BRDF 的衰减。

通过在一次完整的太阳定标过程中所获得的参考漫反射板/比辐射计观测数据与太阳漫反射板观测数据进行比对获得其 BRDF 衰减校正系数 H ，如下式所示：

$$H = \frac{\tau(\theta_{sa,Ref}, \varphi_{sa,Ref}) \cos \theta_{sun,Ref} f_{Ref}(\theta_{sun}, \varphi_{sun}, \theta_{view}, \varphi_{view}, \lambda)}{\tau(\theta_{sa,Tar}, \varphi_{sa,Tar}) \cos \theta_{sun,Tar} f_{Tar}(\theta_{sun}, \varphi_{sun}, \theta_{view}, \varphi_{view}, \lambda)} \quad (3)$$

其中， Ref 的下标代表参考漫反射板或比辐射计的相关参数， Tar 的下标代表太阳漫反射板的相关参数， $\tau(\theta_{sa}, \varphi_{sa})$ 为太阳衰减屏的透过率， θ_{sa} 和 φ_{sa} 分别为卫星坐标系下的入射天顶角和方位角， θ_{sun} 和 φ_{sun} 分别为漫反射板坐标系下的太阳天顶角和方位角， θ_{view} 和 φ_{view} 分别为待定标传感器的观测天顶角和方位角， $f(\theta_{sun}, \varphi_{sun}, \theta_{view}, \varphi_{view}, \lambda)$ 为漫反射板的双向反射分布函数。公式 (2) 中的各角度信息需要在储存定标数据的 L1A 文件中获得。

由于参考漫反射板/比辐射计的使用频率较低，所以通过参考漫反射板/比辐射计获得的相邻的两组衰减校正系数之间，存在一定的时间间隔（通常为两个月）。故为了能够提供太阳漫反射板在每日的衰减情况，以便于高频率的星上定标系数的计算，可以使用插值来补充衰减校正系数 H 的结果。

在传感器积累了一定的太阳定标数据以后，通过建立衰减模型，得到衰减系数的时间序列如下式所示，

最终的任意 t 时刻太阳漫反射板双向反射分布函数可表示为：

$$f_{CAL}(\theta_{CAL}, \varphi_{CAL}; \theta_i, \varphi_i; \lambda_{i,j}; t) = H_{CAL}(\lambda_{i,j}, t) \times f_{lab}(\theta_{CAL}, \varphi_{CAL}; \theta_i, \varphi_i; \lambda_{i,j}) \quad (4)$$

5.6 漫反射板辐亮度计算

太阳定标时刻，在稳定的太阳光源照明下，太阳漫反射板可形成光谱辐射参数已知且能充满待定标

传感器孔径、视场的近似朗伯面光源，根据太阳照明漫反射板的几何关系所确定的太阳漫反射板反射光谱辐亮度物理模型为：

$$L_{CAL}(\theta_{CAL}, \varphi_{CAL}; \theta_i, \varphi_i; \lambda_j) = \frac{E_s(\lambda_j) \cos \theta_{CAL}}{R(t)^2} \times f_{CAL,t}(\theta_{CAL}, \varphi_{CAL}; \theta_i, \varphi_i; \lambda_j) \times \tau(\theta_{SAS}, \varphi_{SAS}) \quad (5)$$

其中：

$L_{CAL}(\theta_{CAL}, \varphi_{CAL}; \theta_i, \varphi_i; \lambda_j)$ 为定标时刻待标传感器各通道观测方向漫反射板反射光谱辐亮度；

$E_s(\lambda_j)$ 为待标传感器各通道的大气外太阳光谱辐照度；

$R(t)$ 为定标时刻的日-地相对距离；

θ_{CAL} 、 φ_{CAL} 、 θ_i 、 φ_i 、 λ_j 分别为定标时刻太阳漫反射板坐标系下的太阳入射天顶角、方位角，以及待标传感器各通道观测方向的漫射板反射天顶角、方位角与波长；

$f_{CAL,t}(\theta_{CAL}, \varphi_{CAL}; \theta_i, \varphi_i; \lambda_j)$ 为定标时刻传感器观测方向各通道的漫反射板双向反射分布函数。

$\tau(\theta_{SAS}, \varphi_{SAS})$ 为太阳定标系统中太阳衰减屏透过率（与太阳照射到衰减屏的角度 θ_{SAS} 有关）。

5.7 计算星上绝对辐射定标系数

根据太阳漫反射板稳定性监测器校正后的太阳漫反射板BRDF及定标时段几何条件，可以计算得到漫反射板出射光谱辐亮度，如下式所示，

$$L_e(B_i)_j = \frac{\tau(\theta_s, \varphi_s; t) \cos(\theta_{SD}, \varphi_{SD}; t) \int E_s(\lambda_i) R_{SR, B_i}(\lambda) \times f_{CAL}(\theta_{SD}, \varphi_{SD}; \theta_i, \varphi_i; \lambda; t) d\lambda}{R^2(t) \int R_{SR, B_i}(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

式中：

$L_e(B_i)_j$ 为第 B_i 像元的 j 像素的入瞳等效辐亮度；

$\tau(\theta_s, \varphi_s; t)$ 为卫星坐标系下， t 时刻照明（天顶角，方位角）为 (θ_s, φ_s) 是的衰减屏透过率；

$\cos(\theta_{SD}, \varphi_{SD}; t)$ 为漫射板坐标系下， t 时刻照明（天顶角，方位角）为 $(\theta_{SD}, \varphi_{SD})$ 时的余弦值；

$R_{SR, B_i}(\lambda)$ 为 B_i 像元的光谱响应函数；

$f_{CAL}(\theta_{SD}, \varphi_{SD}; \theta_i, \varphi_i; \lambda; t)$ 为稳定性监测器校正正后的，漫射板坐标系下， t 时刻照明（天顶角，方位角）为 $(\theta_{SD}, \varphi_{SD})$ ，观测（天顶角，方位角）为 (θ_i, φ_i) 波长 λ 处的双向反射分布函数值；

$R^2(t)$ 日地距离修正因子。

太阳定标时刻，传感器观测漫反射板得到各波段各像素响应计数值 $(DN_{B_i})_j$ ，扣除暗电流后得到传感器系统响应度与计数值关系，即

$$k(B_i)_j = \frac{1}{A(B_i)_j} = \frac{L_e(B_i)_j}{(DN_{B_i} - DN_{B_{i0}})_j} \quad (7)$$

式中， $A(B_i)_j$ 为传感器系统响应度， $k(B_i)_j$ 为发射前实验室定标得到的绝对辐射定标系数。

由于实验室定标溯源与星上定标溯源不能归至同一标准（实验室-低温黑体，星上-太阳），在输入波段辐亮度相同的情况下，传感器的输出计数值并不是完全一致。传感器发射前已经过实验室充分定标，各种特性和参数等均已全部获取，且传感器系统是线性位移不变系统，因此可用星上t时刻漫射板“单点”等效入瞳辐亮度与传感器采用实验室定标系数反演得到的漫射板等效入瞳辐亮度进行比较得到系统太阳定标系数 $F(B_i)_j$ ，即

$$F(B_i)_j = \frac{L_e(B_i)_j}{L_{lab}[DN(B_i)_j, DN(B_{i0})_j, G_{ain,CAL}, T_{FP,CAL}, RTA(\alpha_{CAL})]} \quad (8)$$

实际应用时的观测目标辐亮度即可表示为，

$$L_{Target}(B_i)_j = F(B_i)_j \times L_{lab}[DN_{Target}(B_i)_j, DN_{Target}(B_{i0})_j, G_{ain,target}, T_{FPA,target}, RTA(\alpha_{EV})] \quad (9)$$

参 考 文 献

- [1] GB/T 3102.6-1993 光及有关电磁辐射的量和单位
- [2] Xu H.Y., Zhang L.M., Huang W.X., et al., Onboard absolute radiometric calibration and validation of the satellite calibration spectrometer on HY-1C. *Optics Express*, 2020, 28(20): 30015-30034.
- [3] Robert E. Eplee, Kevin R. Turpie, Gerhard Meister, et al. A synthesis of VIIRS solar and lunar calibrations[C]// *Spie Earth Observing Systems XVIII*. 2013.
- [4] 贾迪, 韩冰, 宋庆君, 等. 海洋水色卫星星上定标技术综述[J]. *海洋技术学报*, 2018, 037(001):P.113-121.
- [5] G. Thuillier, M. Hersé, D. Labs, T. Foujols, W. Peetermans, D. Gillotay, P.C. Simon and H. Mandel, “The Solar Spectral Irradiance from 200 to 2400 nm as Measured by the SOLSPEC Spectrometer from the Atlas and Eureca Missions,” *Solar Physics*, 2003, 214: 1-22.
- [6] Sicong Li, Shuguo Chen, Qingjun Song, Pengmei Xu, Lianbo Hu, Junwei Wang, Chaofei Ma, Jianqiang Liu, and Mingsen Lin. “Correction of the Residual Effect from Solar Beta Angle for Onboard Calibration of Satellite Calibration Spectrometer”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, DOI: 10.1109/TGRS.2023.3264546.