doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2023.03.001

HY-1C 卫星影像中太阳耀斑区域的预测 技术研究

李尉尉1,李雨萌2,李铜基1

(1. 国家海洋技术中心,天津 300112; 2. 宽凳(北京)科技有限公司,北京 100015)

摘 要:对卫星影像太阳耀斑区域的预测是保障基于船舶的现场同步观测(以下简称船-星同步 观测)有效实施的基础性工作。本文在对海洋一号 C 卫星(HY-1C)卫星影像各像元观测几何 分析的基础上,简化构建卫星影像各像元的网格化模型,介绍了利用卫星轨道报估算的卫星-太 阳-像元位置的观测几何,进而估算卫星影像中太阳耀斑区域的技术方法。经与 HY-1C 实际卫 星影像的应用比对,表明本文预测的像元位置、太阳位置,以及卫星观测天底角/方位角均与实 际影像数据有很好的重合度,预测的太阳耀斑区域与实际影像耀斑掩码区重合度良好,验证了 该方法能够预测影像中太阳耀斑区域,保障船-星同步观测的能力。

关键词:HY-1C;卫星影像;太阳耀斑;预测;水色

中图分类号: P738 文献标识码: A 文章编号: 1003-2029 (2023) 03-0001-08

HY-1C 卫星是我国第3颗海洋水色卫星,与海 洋一号 D 卫星(HY-1D)组建了我国首个海洋民用 业务卫星星座,用于连续获取全球水色水温资料, 监测我国海洋带环境变化,同时服务于自然资源 调查、环境生态、应急减灾、农业、气象、水利等 行业^[1]。星载遥感器辐射校正与真实性检验是水色 卫星数据定量化应用的基础,无论是在卫星发射 后的首次在轨测试,还是卫星全寿命周期的辐射性 能跟踪、数据产品检验,星地同步观测都是最重要 的基础性工作^[2],而船-星同步观测是最可靠的技术 手段。

从海岸、船舶甲板、飞机或卫星平台获取的任 何光学影像中都可以看到反射在海面上闪闪发光 的区域,称之为太阳耀斑。太阳耀斑的形成主要是 海面对太阳光的直射反射,当太阳光反射到遥感 器内在遥感影像上会表现出带状明亮区域。直射太 阳光经海面反射而进入观测视场的部分,称为 太阳耀斑辐亮度。卫星对海观测的总辐亮度信号 (L_t) 包含了大气程辐射贡献 (L_{path}) 、太阳耀斑辐 射贡献 (TL_g) 、白帽辐射贡献 (TL_{uc}) 和离水辐射 贡献 (tL_w) ^[3]。

$$L_t = L_{path} + TL_g + TL_{w} + tL_w \tag{1}$$

式中, T为大气直射透过率; t为大气漫射透 过率。

由于太阳耀斑辐亮度的数值远大于水体的离水 辐亮度,因此,卫星影像中的耀斑区域是对海水辐 射特性观测失效区域,通常在卫星数据产品中,都 会对大于设定阈值的耀斑像元进行掩码,以利于卫 星数据的应用^[4]。如果船-星同步观测作业区域恰好 在太阳耀斑区域,会直接导致该同步站位点为无效 观测。针对太阳耀斑的处理,主要有"规避"和 "剔除"两种策略,但在成本昂贵的船-星同步观测

基金项目:海南省重点研发计划资助项目(ZDYF2023GXJS023)

作者简介:李尉尉(1985—),女,硕士,工程师,主要从事海洋水色遥感研究。E-mail: rikki0909@163.com 通讯作者:李铜基(1969—),男,硕士,研究员,主要从事海洋水色遥感研究。E-mail: rsresearch@163.com

收稿日期: 2021-02-19

中,必须规避卫星观测影像中的太阳耀斑区域,才 能保证同步观测工作的有效实施^[5-6]。

目前,国内外学者已经开发了各种算法用于太 阳耀斑提取和校正^[7-9],如 Cox-Munk 模型、Ebuchi-Kizu 模型、Breon-Henriot 模型等。KAY S 等^[10]综述 了两种不同类型的太阳耀斑校正算法, 第一类方法 适用于分辨率在 100~1 000 m 之间的大洋影像, 使 用 Cox-Munk 模型根据风速和风向可计算海面上某 一方向镜像反射耀斑的概率,利用这个概率可预测 耀斑辐亮度大小;第二类方法适用于优于10m的 近岸和浅海区域影像,这类方法是基于光谱形状建 立近红外光谱和耀斑辐亮度之间的关系。ZHANG H 等凹在太平洋、大西洋和印度洋等大洋区域选择了 12个场景,评估了多个太阳耀斑模型,研究发现 Cox-Munk 算法与中分辨率成像光谱仪(Moderateresolution Imaging Spectr-oradiometer, MODIS) 观测 的相关性较好,可以有效估计耀斑的分布。CHEN J 等^[12]开发评估了用于大洋区域的太阳耀斑校正算法, 并与 Cox-Munk 算法进行比对,研究突出了新算法 在太阳耀斑校正中的性能。GANGULY D 等^[13]基于 Cox-Munk 模型,提出了两种太阳耀斑校正算法, 并利用全球区域和局部区域两个场景的 Oceansat-2 OCM(Ocean Colour Monitor)数据对两种算法进行 了测试, 计算结果相对未经过耀斑校正有显著提 高。宽视场水色扫描仪(Seaviewing Wide Field-ofview Sensor, SeaWiFS)、海洋水色和温度扫描仪 (Ocean Colour and Temperature Scanner, OCTS) 和 海岸带水色扫描仪 (Coastal Zone Color Scanner, CZCS) 试图通过将传感器从最低点倾斜 20°以减少 太阳耀斑污染,但即使有这种功能,依然有耀斑污 染的区域需要掩码[11]。OCM-1 和 OCM-2 使用有效 载荷转向装置将传感器倾斜±20°,以最大限度地减 少印度洋区域的耀斑影响,但耀斑影响依然存在, 仅仅是区域发生了变化,耀斑区域向高纬度地区移 动^[13]。对于 HY-1C、MODIS 等多数水色卫星传感器 没有这样的倾斜装置和功能,耀斑污染的现象可能 更为严重。为此,本文在前人研究的基础上,利用 卫星轨道报估算出卫星-太阳-像元位置的几何关 系,预测 HY-1C 卫星影像中出现太阳耀斑的区域 以规避该区域,具有实际应用价值。

1 方法

1.1 太阳耀斑辐亮度的计算

太阳耀斑辐亮度(Lg)可表示如下¹¹⁴。

$$L_{g}(\lambda) = F_{0}(\lambda)T(\theta_{s},\lambda)L_{GN}$$
(2)

式中, $F_0(\lambda)$ 为经日地距离修正且经大气气体 (如臭氧)吸收修正后的大气层顶太阳辐照度^[15]; $T(\theta_s,\lambda)$ 为卫星观测天底角方向的大气直射透过率; L_{GN} 是归一化太阳耀斑辐亮度,可根据特定太阳和 观测方向,利用 Cox-Munk 风速-海浪坡度分布的方 位角对称分析模型计算得到,注意此处 L_{GN} 与波长 无关。 L_{GN} 的物理意义是假设无大气且大气层外太阳 辐照度 $F_0(\lambda) = 1$ 时恰在海面之上的太阳耀斑辐亮 度,可表示如下^[11]。

$$L_{GN} = \frac{R(\omega)}{4\cos\theta\cos^4\beta} P(z_{x'}, z_{y'})$$
(3)

式中, $R(\omega)$ 为空间散射角为 ω 的非偏振光菲涅 尔反射率; θ 为卫星观测天底角; β 为海面波浪面元 的反射方向天顶角, $f \cos\beta = \frac{\cos\theta + \cos\theta_0}{2\cos\omega}$; θ_0 为太 阳天顶角; $P(z_{x'}, z_{y'})$ 为 Cox-Munk 模型的海浪坡度分 布函数。在卫星影像处理中, 对于 $L_{CN} > 0.005$ sr⁻¹ 的像元采用掩码处理^[3]。

由此可见,耀斑辐亮度是太阳天顶角、卫星观 测天底角、相对太阳方位的卫星观测相对方位角、 风速,以及相对太阳方位的风向角的函数。

1.2 卫星观测几何的估算与假设

太阳天顶角、卫星观测天底角、相对太阳方位 的卫星观测相对方位角共同描述了卫星对海观测的 几何,通过卫星轨道报可以估算得到这些参数。以 HY-1C 卫星为例,其卫星两行轨道报数据(Two-Line Orbital Element, TLE)轨道两行报数据如图 1 所示。由卫星轨道报可计算任意给定时间的星下点 位置和轨道倾角^[11]。图 1 中的第一行 43609U 是卫星 编号,18068A 是国际编号,18068 表示 2018 年第 68 次发射,20 131.333 333 33 表示这组轨道数据的 时间点是 2020 年第 131 天的 33 333 33 s,.00000000 00000-0-26992-4 为轨道模型参数,0 是 SGP4/SDP4 轨道模型,999 是 HY-1C 的第 999 组 TLE 参数,9 是 校验位。第二行,98.530 7 是轨道倾角,207.177 9 是升交点赤经,0011446 表示轨道偏心率,实际值 为 0.001 144 6,249.384 8 是近地点幅角,42.829 9 为平近点角,这组 TLE 对应的时刻卫星在轨道的位 置,14.341 661 03 是每天环绕地球的圈数,8 762 是发射以来飞行的圈数,9 是校验位。

1 43609U 18068A 20 131.333 333 33 .000 000 00 00000-0-26992-4 0 9999 2 43609 98.530 7 207.17 7 90011446 249.384 8 42.829 9 14.341 661 03 87629

图 1 HY-1C 卫星 TLE 轨道两行报 (http://www.nsoas.org.cn, 2020-05-10)

我国 HY-1 系列卫星的主要载荷——海洋水色 水温扫描仪(Chinese Ocean Color Temperature Scanner, COCTS)为扫描式观测,主要用于探测我国及 全球海域的海洋水色和水温环境信息,图 2 为 HY-1C 海洋水色水温扫描仪。为了研究 HY-1C COCTS 影 像的成像特点,选择了两景影像作为研究对象,一 景为极地观测的影像,另一景为北纬 30°我国沿海 观测的影像。为表述方便,分别将这两景影像定义 为影像1和影像2,如表1所示。本文使用的 HY-1C 卫星数据由国家卫星海洋应用中心提供,获取 网址为 https://osdds.nsoas.org.cn。



图 2 HY-1C 海洋水色水温扫描仪

表 1 HY-1C 影像成像特点的研究对象

序号	数据源	_
影像1	H1C_OPER_OCT_L1B_20200510T070448_20200510T070500_08772_10.h5	_
影像 2	H1C_OPER_OCT_L1B_20200511T014000_20200511T014500_08772_10.h5	

通过对影像的数据统计,可得出 HY-1C 卫星 每行扫描 1656 像元,以星下点为中心分布于两侧¹⁰。 图 3 给出这两景影像各扫描行第 1、401、829 和 1 656 像元的卫星观测天底角,以及两景影像第 1 656 像元卫星观测天底角的对比。图 4 给出两景 影像各像元对地观测天底角的平均值与标准差。由 图 3 和图 4 可知,相同序号的像元对地观测天底角 略有差异,差异小于 1°,为便于计算,本文可以假 设卫星每行扫描相同序号像元的观测天底角相等。 由于卫星对单个扫描行的观测时间很短(约



(左图为影像1,中图为影像2,右图为两景影像第1656像元观测天底角的对比)

0.16 s),为计算方便,本文假设每个扫描行均垂直于 轨道。这样在得到扫描行各像元观测天底角后, 根据卫星轨道报给出的卫星高度,以及根据过境 前后时间星下点位置计算的轨道倾角,可简单计算 出各像元中心点对应的地面经纬度^[17]。在得到像元 经纬度后,可根据卫星轨道数据和过境时间计算 出各像元卫星观测天底角和方位角、太阳天顶角和 方位角。



图 4 两景影像各像元对地观测天底角的平均值(左图)与标准差(右图)

1.3 太阳耀斑区域预测的模型

本研究预测模型利用 Python GeographicLib 地 理计算库和 Pyephem 天文库实现, Python 是一个有开 放、开源精神的编程语言,目前已应用于火星探测、 搜索引擎、引力波分析等众多领域。GeographicLib 地理计算库主要用于执行地理、UTM、UPS、MGRS、 地心和本地笛卡尔坐标之间的转换,用于重力(例 如 EGM2008)、大地水准面高度和地磁场(例如 WMM2010)计算,以及解决测地问题。Geographiclib 库包含的 Geodesic. Direct 函数可根据一个点的 经纬度位置与第二个点的距离及相对方位角,计算 第二个点的经纬度。该库包含的 Geodesic.Inverse 函 数可根据两个点的经纬度坐标,计算得到两个点的 相对方位角等。

本文涉及的星体天文计算,采用的是Pyephem 天文库,该库可用于进行高精度天文计算。该库在 给定一个时间或者同时给出时间和观测者的位置, 可以用来计算输出一些天体或者人造卫星的位置, 还可以进行一些坐标系统和时间系统的计算和转 换。Pyephem 库使用的是 Jean Meeus 的 Astronomical Algorithms 里的算法,类似 IAU 1980 地球章动 模型和vsop87 行星运动理论的算法,精度在 1"左 右,对于精度要求不是特别高的计算,使用 Pyephem 的优势是运算速度快且语句简洁易懂。

根据卫星轨道参数,可以精确计算卫星过境时间和星下点位置。针对感兴趣的目标区域,通过设定一个时间序列(如5s为步长),即可构建卫星扫描行的数学模型。根据上述对扫描行内各像元观测天底角的分析和假设,可设定单侧为0°~60°范围以

1°为间隔的观测天底角,即构建扫描行内 121 个像 元模型。

像元网格模型建立后,即可计算各像元卫星观 测天底角和方位角、太阳天顶角和方位角^[17]。如本 文1.1节所述,风速风向是影响太阳耀斑辐亮度数 值大小的因素之一,且太阳耀斑辐射贡献较海水辐 射贡献大且方向性突出,很容易半定量化判断其区 域。本文的目的是预测卫星影像中太阳耀斑区域, 以便船-星同步观测时规避耀斑,因此,可简单假 设或预估风速风向用于计算太阳耀斑辐亮度值,确 定耀斑区域位置。图5给出了预测卫星影像中太阳 耀斑区域的流程和方法。



图 5 卫星影像太阳耀斑区域预测流程图

2 验证与应用

依据上述假设与预测流程,利用影像2对计算 得到的像元位置、太阳位置和观测天底角/方位角进 行验证。图6和图7分别给出影像2中3个时间点 (UCT1:40,1:43,1:45)扫描行各像元位置(经 纬度)、太阳位置(天顶角和方位角)与计算结果 的比对。由图可见,计算结果与影像数据的差异较 小,对太阳耀斑区域预测影响不大,主要是位置上 的差异,有可能是轨道报信息存在误差。就此,在 验证各像元观测天底角和方位角时,设定5s的时 间差,以避免方位角在0°附近出现180°方位差异, 图8给出影像2中UCT1:45扫描行各像元卫星观 测天顶角和方位角与计算结果比对,可见,同样存 在较小的差异,但不会影响太阳耀斑区域的预测。







图 9 给出影像 2 所在轨道模型预测的太阳耀斑 区域与影像中实际耀斑掩码区的效果对比。可见, 预测的耀斑区域准确,范围略大于实际影像的耀斑

掩码区,能够达到指导船-星同步观测规避太阳耀 斑的目的。

图 9 2020-05-11 UCT1:35 轨道太阳耀斑预测区域与实际 影像 2 耀斑掩码区的对比(黄点为卫星影像的像元位置; 绿点为卫星影像太阳耀斑掩码像元;蓝点为预测模型的 像元:红点为预测太阳耀斑区域)

为了进一步验证预测效果,本文选取 2020 年 5 月 13 日、2020 年 7 月 11 日的 HY-1C 影像和2020 年 7 月 20 日 HY-1D 影像进行预测效果比对,如图 10 所示。验证影像数据分别为:

H1C_OPER_OCT_L2A_20200513T021500_2020 0513T022000_08801_10.h5

H1C_OPER_OCT_L2A_20200711T025500_2020 0711T030000_09647_10.h5

H1D_OPER_OCT_L2A_20200720T054500_2020 0720T055000_00567_10.h5

由图 10 可知,按照本文对太阳耀斑区域预测的假设和流程可基本准确预测 HY-1C 卫星影像的

世界标准时间:2020-05-13 02:10:00 北京时间:2020-05-13 10:10:00 耀斑预测图

世界标准时间:2020-07-11 02:45:00 北京时间:2020-07-11 10:45:00 耀斑预测图

世界标准时间:2020-07-20 05:35:00 北京时间:2020-07-20 13:35:00 耀斑预测图

图 10 2020-5-13 UCT2:10 (上图)、2020-7-11UTC 2:45 (中图) HY-1C 卫星轨道和 2020-7-20UTC 5:35 (下图) HY-1D 卫星轨道太阳耀斑预测区域与实际影像耀斑掩码区 的对比 耀斑区域,区域位置大致在降轨轨道星下点偏右 侧,同时,本文的研究方法也可应用于具有相似机 制的 HY-1D 影像耀斑区域的预测,区域位置大致在 降轨轨道星下点偏左侧。由此通过本文研究可指导 船-星同步观测站位设计时提前规避卫星影像中的耀 斑区域,从而高效准确地实施同步在轨观测试验。

3 结 论

海洋水色卫星遥感数据在很大程度上会受到海 面上直射太阳光反射的影响。船-星同步观测是卫 星遥感器辐射校正与真实性检验工作中重要的技术 手段之一。通过预测卫星影像耀斑区域可有效提高 成本昂贵的船-星同步观测的效力。太阳耀斑是因 波动的海面直接反射太阳直射光所形成, 它与太阳 位置、观测天底角/方位角和海面的波动情况有关。 本文在对 HY-1C 卫星影像各像元观测几何分析的 基础上,为简化计算,提出了预测卫星影像耀斑区 的一些假设,包括:①假设扫描行内相同序号的像 元对地观测天底角相同: ②假设每个扫描行均垂直 于轨道。通过假设可简单地构建卫星影像各像元的 网格化模型,进而根据轨道报计算各像元位置的太 阳天顶角和方位角、卫星观测天底角和方位角。最 后根据太阳耀斑辐射贡献的特点,预估风速风向计 算各像元太阳耀斑辐射贡献的程度,从而预测出耀 斑区域。

经与实际影像的比对验证,本文预测的像元位 置、太阳位置和卫星观测天底角/方位角均与实际影 像数据具有很好的重合度,图6影像2中3个时间 点UCT1:40、UCT1:43和UCT1:45扫描行各像 元位置与计算结果比对和图8影像2中UCT1:45 扫描行各像元卫星观测天顶角与方位角与计算结果 比对,预测的太阳耀斑区域与实际影像中耀斑掩码 区重合度良好(图9和图10),能够达到指导船-星同步观测规避太阳耀斑的目的。

第3期	
参考文南	ŧ:

- [1] 刘建强, 蒋兴伟, 王丽丽, 等. 海洋一号 C、D 卫星组网观测与应用[J]. 卫星应用, 2021, 9: 19-26.
- [2] MCCLAIN C R, ESAIAS W E, BARNES W, et al. Calibration and validation plan for SeaWiFS[R]. Greenbelt, Maryland: NASA Tech, 1992.
- [3] MOBLEY C D, WERDELL J, FRANZ B, et al. Atmospheric correction for satellite ocean color radiometry: A tutorial and documentation of the algorithms used by the NASA ocean biology processing group[R]. Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 2016.
- [4] MCCLAIN C R, DARZI M, BARNES R A, et al. SeaWiFS calibration and validation quality control procedures[R]. Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 1996.
- [5] MULLER D, KRASEMANN H, BREWIN R J W, et al. The ocean colour climate change initiative: I. A methodology for assessing atmospheric correction processors based on in-situ measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 162: 242-256.
- [6] BAILEY S W, WERDELL P J. A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products[J]. Remote sensing of environment, 2006, 102(1-2): 12-23.
- [7] COX C, MUNK W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter[J]. Journal of the Optical Society of America, 1954, 44(11): 838-850.
- [8] EBUCHI N, KIZU S. Probability distribution of surface wave slope derived using sun glitter images from geostationary meteorological satellite and surface vector winds from scatterometers[J]. Journal of oceanography, 2002, 58: 477–486.
- [9] BREON F M, HENRIOT N. Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2006, 111(C6): 1–10.
- [10] KAY S, HEDLEY J D, LAVENDER S. Sun glint correction of high and low spatial resolution images of aquatic scenes: A review of methods for visible and near-infrared wavelengths[J]. Remote sensing, 2009, 1(4): 697–730.
- [11] ZHANG H, WANG M H. Evaluation of sun glint models using MODIS measurements[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2010, 111(3): 492–506.
- [12] CHEN J, HE X Q, LIU Z L, et al. Sun glint correction with an inherent optical properties data processing system[J]. International Journal of Remote Sensing, 2021, 42(2): 617–638.
- [13] GANGULY D, ALI S M, RAMAN M. Sun Glint characterization in an ocean color sensor with different payload tilts and correction algorithms for glint: A study using Oceansat- II ocean colour monitor[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2021, 49: 3013–3025.
- [14] WANG M H, BAILEY S W. Correction of sun glint contamination on the SeaWiFS ocean and atmosphere products[J]. Applied Optics, 2001, 40(27): 4790–4798.
- [15] GORDON H R, WANG M H. Surface-roughness considerations for atmospheric correction of ocean color sensors 1: the Rayleighscattering component [J]. Applied Optics, 1992, 31(21): 4247–4260.
- [16] 国家卫星海洋应用中心. HY-1CD 数据格式说明(L2-L3)[EB/OL]. (2019-03-19)[2020-07-25]. https://osdds-ftp. nsoas.org.cn.
- [17] KARNEY C F F. GeographicLib(Version 1.50.1)[EB/OL]. (2019-09-24)[2020-08-30]. https://geographiclib.sourceforge.io.

Research on Prediction Technology of Sun Glint Region in HY-1C Satellite Image

LI Weiwei¹, LI Yumeng², LI Tongji¹

(1. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China; 2. Kuandeng (Beijing) Technology

Co., Ltd., Beijing 100015, China)

Abstract: The prediction of sun glint area in satellite image is foundational work to ensure the effective implementation of ship-satellite synchronous observation. In this paper, based on the geometric analysis of each pixel in the HY-1C image, we simplify the grid model of each pixel, and introduce the technical method to estimate the sun glint area in the satellite image. This method is based on the observation geometry of the satellite-sun-pixel position estimated by the satellite orbit report. Comparing the practical applications of satellite images with HY-1C, we find that the position of the pixel, the position of the sun and the nadir angle/azimuth angle of the satellite observation in this paper have a good coincidence with the actual image data, and the predicted sun glint area coincides well with the actual image glint mask area. This method is validated in the prediction of solar sun glint area, guarantee ship-star synchronous observation ability. **Key words:** HY-1C; satellite image; sun glint; prediction; ocean color