

# 海洋 B 星水色仪辐射基准异常分析及修复算法研究

范文龙<sup>1,2,3</sup>, 黄小仙<sup>1,2\*</sup>, 傅雨田<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 水色遥感产品的三要素为: 叶绿素、悬浮物质和黄色物质。水色水温扫描仪(简称水色仪)作为海洋一号卫星的主载荷之一, 设置了 8 个可见近红外探测通道, 主要目的是获取全球的海色三要素分布产品, 为全球海洋初级生产力分布研究提供数据。2007 年发射的 HY-1B 星水色仪, 作为零辐射基准的冷空位置在入轨初期即存在光污染, 导致近红外探测通道深海水域信号出现截止, 并且纬度越低冷空信号越大。为了研究此问题的存在机理并对 B 星水色仪的历史数据进行修复, 在实验室对问题产生源的特性进行了验证, 并对其影响机理进行了分析。通过获取 C 星水色仪耀光能量与太阳天顶角的关系, 计算 B 星水色仪在不同太阳天顶角的耀光能量。根据辐射定标系数可得到耀光能量对应的信号码值和码值修复量。结果表明, 该修复值与由太阳天顶角计算得到的能量成线性关系, 并可用于对 B 星水色仪其他目标信号进行修复。该算法可用于对 B 星水色仪近 9 年的遥感数据的修复, 为后续与同类海洋遥感仪器的数据比对并反演水色产品奠定了理论基础。

**关键词:** 海洋一号卫星; 水色水温扫描仪; 太阳同步轨道; 可见近红外; 冷空间; 太阳耀光  
**中图分类号:** V443+5      **文献标识码:** A

## Analysis of radiation reference anomaly of HY-1B COCTS and research on the repair algorithm

FAN Wen-Long<sup>1,2,3</sup>, HUANG Xiao-Xian<sup>1,2\*</sup>, FU Yu-Tian<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The three elements of water color remote sensing products are chlorophyll, suspended substance and yellow substance. As one of the main loads of HY-1 satellite, Chinese Ocean Color and Temperature Scanner (COCTS) has set up 8 visible and near-infrared detection channels, to provide primary data for the study of global ocean primary productivity distribution. HY-1B COCTS was launched in 2007, and at the beginning of orbit entry there exists light pollution in cold space which works as the zero-radiation datum, which leads to the signal cut-off in the deep-sea area of the near-infrared detection channel, and the lower the latitude, the bigger the cold air signal is. In order to study the mechanism of the problem and repair the historical data of HY-1B COCTS, the characteristics of the source of the problem was verified in the laboratory, and the influence mechanism was analyzed. Based on the relationship between the sun glint energy of HY-1C COCTS and the solar zenith angle, the sun glint energy of HY-1B COCTS at different solar zenith angle is calculated. According to the radiometric calibration coefficient, the corresponding code value of the sun glint energy and the correction quantity can be obtained. The results show that the correction quantity is linear with the energy calculated from the solar zenith angle, and can be used to repair other target signals of HY-1B COCTS. This algorithm can be used to repair the remote sensing data of nearly 9 years of HY-1B COCTS. It lays a theoretical foundation for data comparison between the same kind of ocean remote sensing instrument and retrieving water color products.

**Key words:** HY-1 satellite, Chinese Ocean Color and Temperature Scanner (COCTS), sun-synchronous orbit, Visible

收稿日期: 2021-03-31, 修回日期: 2021-10-28

Received date: 2021-03-31, Revised date: 2021-10-28

基金项目: 国家重点研发计划资助(2018YFB0504900, 2018YFB0504904)

Foundation items: Supported by National Key R&D Program of China (No. 2018YFB0504900; No. 2018YFB0504904)

作者简介 (Biography): 范文龙 (1979-), 男, 山东菏泽人, 副研究员, 博士生, 主要从事航天遥感方面的研究. Email: wlongvan@mail.sitp.ac.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: huangxiaoxian@139.com

near infrared (VNIR), cold space, sun glitter

## 引言

海洋一号卫星(HY-1)是我国自主研制的第一代太阳同步轨道海洋光学遥感卫星,先后于2002年、2007年、2018年和2020年发射了HY-1A, HY-1B, HY-1C和HY-1D四颗海洋遥感水色卫星,运行在高度近800 km的太阳同步轨道上。四颗卫星均搭载了包括8个可见近红外波段和2个热红外波段的水色仪,主要用于对海洋水色、海温环境和海冰等要素进行探测<sup>[1]</sup>,同时可获得水体中浮游植物、悬浮物、溶解有机物等的浓度信息,并可对海洋生态、渔业资源等方面进行监测<sup>[2]</sup>。目前A/B星水色仪已经退役,C/D星水色仪与中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)传感器均为上、下午双星组网运行的星座,两者的主要性能参数如表1所示。HY-1C卫星在轨测试总结通过评审,整星性能达到国际先进水平<sup>[3]</sup>;D星水色仪在轨性能正在测试中。

表1 水色仪与MODIS主要性能

Table 1 Main performance of COCTS and MODIS

技术指标	C/D星水色仪	MODIS
轨道高度(km)	782	705
轨道类型	太阳同步	太阳同步
轨道周期(分钟)	100.6	98.8
地球覆盖周期(日)	0.5~1	1~2
波段范围( $\mu\text{m}$ )	0.4~12.5	0.4~14.4
地面分辨率(m)	1 100	250~1 000
幅宽(km)	2 900	2 330
设计寿命(年)	5	5~6

B星水色仪入轨初期即发现冷空位置受未知辐射源干扰<sup>[4-5]</sup>,造成冷空基准信号不为零,而且随着纬度与季节等的变化而变化,对应的10个冷空采样点信号也呈现快速变化。同时导致作为热红外通道高温辐射基准的黑体信号以及部分深海区域近红外探测通道信号截止<sup>[6]</sup>,最终导致B星水色仪数据无法进行定量化应用。有学者尝试采用易截止的近红外通道第8波段的数据数值整体提升<sup>[7]</sup>的方法对水色仪数据进行修复,虽然有一定的效果,但因为该方法需要根据每一轨道数据的地理信息和光照条件等因素来确定截止数据的补偿值,计算过程繁杂,难以得到定量化业务的应用推广。B星水

色仪虽然是试验星、断续开关机工作,但在9年在轨工作时间内,积累了大量的、尤其是我国近海水域的卫星观测数据,获取了宝贵的数据资源。因此针对B星水色仪在轨冷空基准异常遥感数据的修复,对目前在轨服役的C/D星水色仪运作模式和数据处理方式具有指导性作用;经过修复的B星水色仪数据经过进一步定标,可最终用于海色三要素的反演,与目前作为业务星运行的C/D星水色仪一起,对我国海洋水色信息的长时间连续观测数据库的建立具有重要意义。

本文从仪器研制方的角度,对B星水色仪在轨辐射基准受到光污染的规律与机理进行数据分析与实验验证。在此基础上,以B/C星水色仪可见近红外通道的耀光能量作为载体,建立合适的数学模型,对图像数据进行修复,并供给其他单位进行星星比对再定标和海色产品的反演。从目前初步处理结果看出,B星水色仪与MODIS的信号相关性相对修复前有了较大提高,说明数据修复达到了预期效果。

## 1 在轨异常现象及对定量化的影响

B星水色仪可见近红外波段,在整个运行生命周期内,阳照区用于辐射基准的冷空信号对应的输出码值均高于发射前辐射定标过程所预留的暗电平码值,而且卫星过境星下点对应的纬度绝对值越小(太阳天顶角越小),冷空信号码值越大;换言之,星下点对应的太阳辐照度越大,冷空信号受到的污染越大。而水色仪作为零辐射基准的冷空直流恢复位置与冷空采样位置相差的角度很小,从深海区域一类水体近红外探测通道信号截止的现象可以看出,冷空直流恢复位置也受到了污染,从而影响地球目标信号的精确稳定采集。

### 1.1 在轨异常现象表现

水色仪采用45°扫描镜+K镜像消旋+4元探测器并扫+机械制冷的方案<sup>[8]</sup>,其成像原理如图1所示。

水色仪通过卫星的飞行和45°扫描镜的转动来实现对地物的二维扫描成像,扫描镜转动一周为一个扫描周期,K镜用来实现信号的像旋消除<sup>[9]</sup>。由于装调误差的影响,在K镜的A面和B面两个工位的信号略有差异。水色仪的采样时序如图2所示,

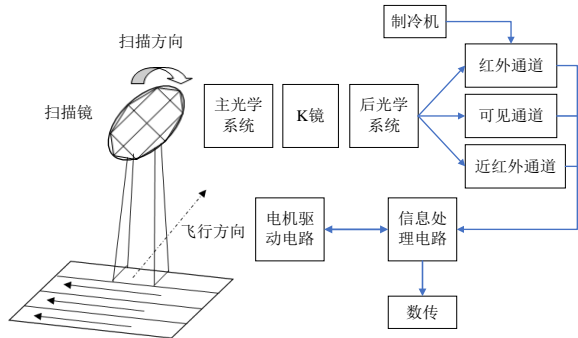


图1 水色仪成像示意图

Fig. 1 Imaging diagram of COCTS

以扫描电机霍尔脉冲作为一个扫描周期的时序同步信号,自霍尔脉冲下降沿开始,分别对冷空间、地球区和黑体等位置的信号进行采样。信息获取电路的前级放大为交流放大,在扫描镜转至冷空直流恢复开始位置时,信息获取后级放大电路接收系统控制电路发送的1 ms脉宽的直流恢复脉冲,将冷空直流恢复处的信号强制箝位到设置的暗电平,并将其作为辐射参考基准,从而实现交流信号向直流信号的转化。直流恢复结束后,在1.5 ms(0.84°)的时间内进行10个冷空采样点的信号获取。

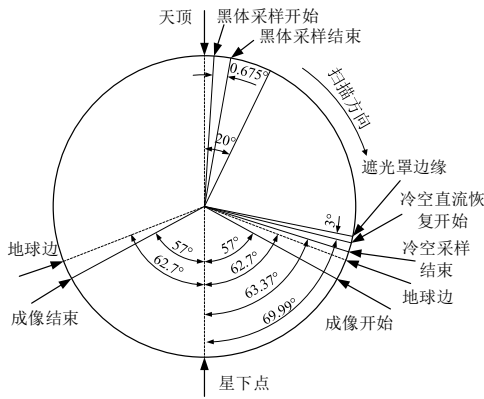


图2 水色仪扫描周期

Fig. 2 Scanning period of COCTS

正常情况下,可见近红外通道的冷空信号与黑体信号均为暗电平信号,而水色仪B星发射入轨后发现冷空信号远大于电路设置的暗电平。在阳照区时,水色仪冷空受到的干扰与地物辐射和天顶角 $\theta$ 有较大的关联性: $\theta$ 越小(靠近赤道),地物辐射强度越大,对冷空的干扰越强; $\theta$ 越大(靠近两极),地物辐射强度越小,对冷空的干扰较小或不明显。冷空在受到干扰时信号变大,从而导致地球区和黑体信号相对冷空基准的幅度变小。在阴影区,由于没

有太阳和地物辐射的影响,冷空和黑体信号恢复到正常的暗电平码值。

选取通道4第1元的10个冷空采样点信号对在轨现象进行描述,如图3所示。从图中可以看出,从冷空采样点1到采样点10的信号依次增大;而且横坐标从左到右代表了一个从北到南横穿赤道的过程,星下点纬度越接近赤道,地物目标的光照度越大,冷空信号码值也越大。

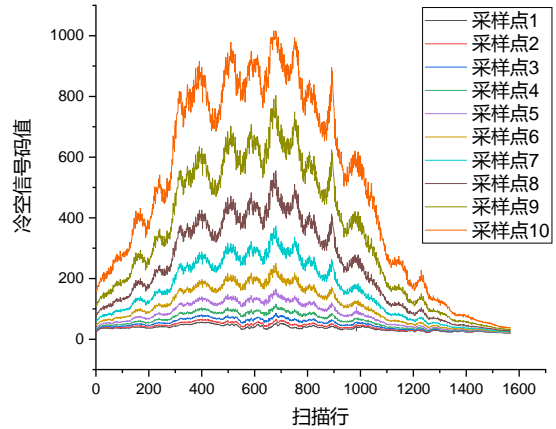


图3 阳照区冷空信号

Fig. 3 Cold space signal in sunshine area

此外,每一行的10个冷空采样点信号也呈现出一定的规律性,如图4所示,越接近地球的冷空采样点,信号越大。10个冷空采样信号具有明显的相关性,应为共同的干扰源导致的。

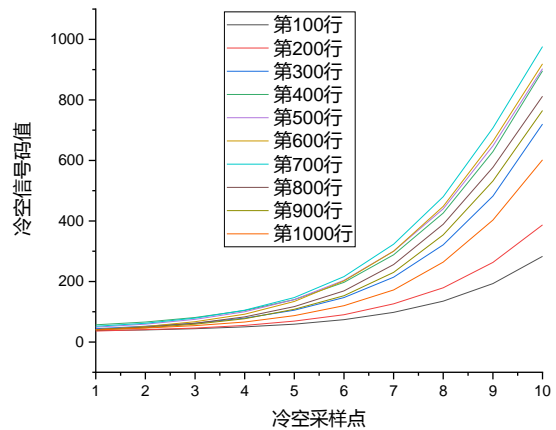


图4 不同帧的冷空信号

Fig. 4 Cold space signal of different frame

相对于冷空信号,阳照区的黑体采样信号则小于电路设置的约20个码值的暗电平信号,甚至出现了截止现象,如图5所示,而阴影区的黑体信号均正常。

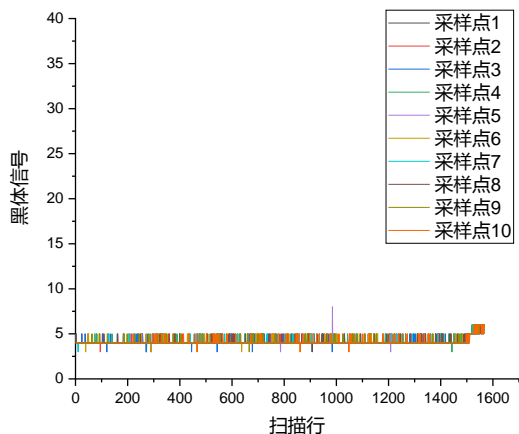


图5 阳照区黑体信号

Fig. 5 Blackbody signal in sunshine area

## 1.2 对定量化应用的影响

在卫星发射入轨前,对B星水色仪可见近红外通道进行了辐射定标<sup>[10]</sup>,以蜂窝黑体(简称蜂窝)作为冷空位置的箱位基准目标,对各个谱段的动态范围和像元间的均匀性进行调整设置,并获得各探测通道的定标系数,用于在轨数据的定量化反演。由定标结果可以看出,水色仪对目标的响应可表达为:

$$N_B = \alpha_B * (E_B - E_{B0}) + \beta_B \quad (1)$$

式中 $N_B$ 为系统输出码值, $\alpha_B$ 为系统响应系数, $\beta_B$ 为暗电平, $E_B$ 为目标到达大气层顶的辐亮度, $E_{B0}$ 为冷空处的辐亮度。理想情况下 $E_{B0}$ 为0,即使 $E_{B0}$ 不为0,若能保持一个稳定值,亦能根据公式(1)准确计算出仪器的响应。

当辐射基准受到干扰,造成 $\Delta E_{B0}$ 的改变时,定标系数 $\beta_B$ 也会随着改变,变化量为 $\alpha_B * \Delta E_{B0}$ ;但若 $E_{B0}$ 不断变化,则会造系统响应的不稳定。因此,冷空辐射基准信号的稳定程度,直接决定了水色仪在轨数据能否被定量化应用以及应用的难度。

要对B星水色仪的数据进行定量化应用,必须获取影响冷空信号大小的决定因素,并在此基础上进行数学建模,得到可适用于整个生命周期内数据修复的数学公式及其系数,否则后续再定标处理无从谈起。

## 2 地面试验验证

### 2.1 试验说明

基于上述在轨数据分析结果,为了验证冷空干扰信号的影响因素,在对B星水色仪的工程样机进行适应性改造的基础上,在实验室进行此在轨现象

的地面再现。

用积分球模拟来自地球的目标辐射,用带有准直功能的氙灯(氙灯作为光源)模拟来自太阳的直接辐射。用具有不同特性的物体来模拟冷空直流恢复位置的未知物体:漫反射体采用反射率较低的蜂窝和反射率为99%的漫反射白板两个极端目标加以仿真;镜面反射物体使用来自于卫星的多层热控包扎材料。实验装置示意图如图6所示。

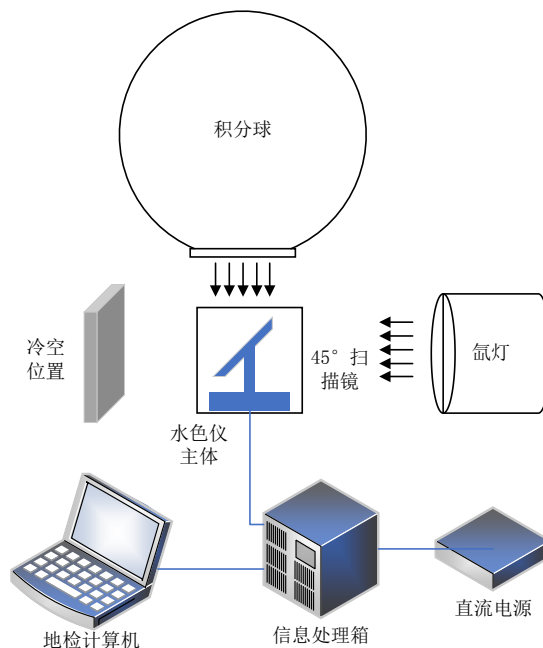


图6 实验示意图

Fig. 6 Schematic of the experiment

水色仪8个可见近红外探测通道的谱段范围及应用对象如表2所示。

表2 水色仪可见近红外谱段范围

Table 2 VNIR spectral range of COCTS

通道	谱段( $\mu\text{m}$ )	应用对象
1	0.402 ~ 0.422	黄色物质、水体污染
2	0.433 ~ 0.453	叶绿素吸收
3	0.480 ~ 0.500	叶绿素、海水光学、海冰、污染、浅海地形
4	0.510 ~ 0.530	叶绿素、水深、污染、低含量泥沙
5	0.555 ~ 0.575	叶绿素、低含量泥沙
6	0.660 ~ 0.680	中高含量泥沙、大气校正、污染、气溶胶
7	0.734 ~ 0.754	大气校正、高含量泥沙
8	0.845 ~ 0.885	大气校正、高含量泥沙

实验中在冷空位置分别放置3种不同的反射体,在氙灯开和关两种状态下,对8个可见近红外通道的冷空、黑体和积分球信号码值进行采集,实验

数据表明8个谱段各个探测元的信号变化规律基本一致。下面以第4谱段第1元信号的响应数据为例,对各种情况下的变化规律进行说明和分析。

在实验前对积分球的能量进行了标定,对应第4谱段的光谱辐亮度如表3所示。

表3 积分球能级

Table 3 Energy level of integrating sphere

开灯数量	灯功率(W)	第4谱段光谱辐亮度 ( $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}\cdot\text{Sr}^{-1}$ )
0	0	0
1	150	1.416
2	150+50	2.727
3	150+50+100	5.999
4	150+50+100+200	11.146
5	150+50+100+200+300	21.511

## 2.2 试验结果

### (1) 黑体信号

如图7所示,从黑体信号变化规律可以看出,在无氙灯的情况下,采用白板和蜂窝作为冷空目标时,黑体信号码值一致。积分球开灯数量增加时,由于冷空位置被逐渐照亮,黑体信号略有减小。

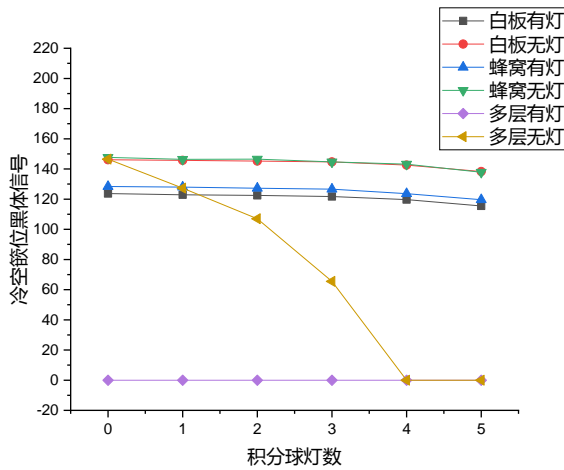


图7 黑体信号

Fig. 7 Blackbody signal

当开启氙灯时,虽然白板的反射率远大于蜂窝,但是黑体信号的码值仅比蜂窝时的码值小幅减小。因此,黑体信号如果受到冷空位置漫反射目标反射地球辐射的影响,码值会有少量减小,但并不会导致信号的大幅下降或截止。

当采用多层作为冷空位置目标仿真时,不开氙灯的情况下,黑体信号随着积分球灯的数量增加而

明显减小直至截止;当开启氙灯时,黑体信号完全截止。由此可见,如果在冷空处有类似多层热控材料的镜面反射物体存在时,将会明显受到地球辐射的影响,而且与地球辐射强度呈正相关。若太阳光线反射到冷空位置的镜面反射物上,则会导致黑体信号出现截止。

### (2) 冷空采样信号

由图8可知,当采用蜂窝时,由于反射率低,受到氙灯和积分球的影响差别比较小,冷空采样位置相对冷空箱位位置的信号基本相同。

当采用漫反射白板时,氙灯不开时的信号基本不受影响;当氙灯开启,并且积分球开的灯数足够多时,冷空信号才有所增加。由此可见,采用高反射率的白板并不能使冷空信号大幅增加。

当采用多层且氙灯开启时,由于氙灯覆盖冷空位置范围较广,导致直流恢复信号和冷空信号大小相近,因此冷空信号发生了截止;氙灯未开启时,冷空信号随积分球灯数的增加缓慢增大。

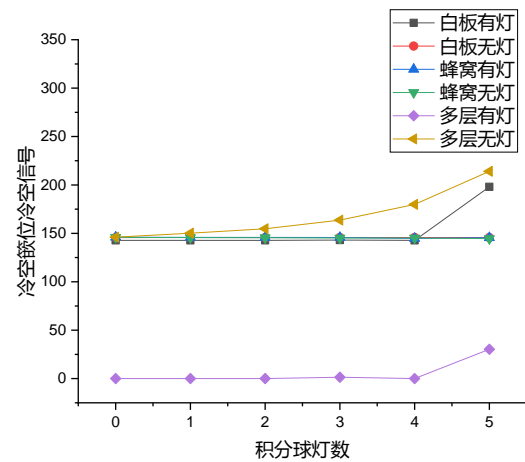


图8 冷空信号

Fig. 8 Cold space signal

### (3) 积分球信号

由图9可知,积分球信号的变化规律与黑体信号基本相同。只有在放置多层且开启氙灯的情况下,才会导致积分球信号截止,其余情况对积分球信号的影响较小。

### (4) 多层包扎的影响

由图10可知,在开氙灯的情况下,黑体和积分球信号均发生截止;由于冷空位置多层受到积分球光线的影响,导致在未开氙灯时,黑体和积分球信号也有一定程度的减小。此两种情况,均与B星水色仪的在轨现象一致。

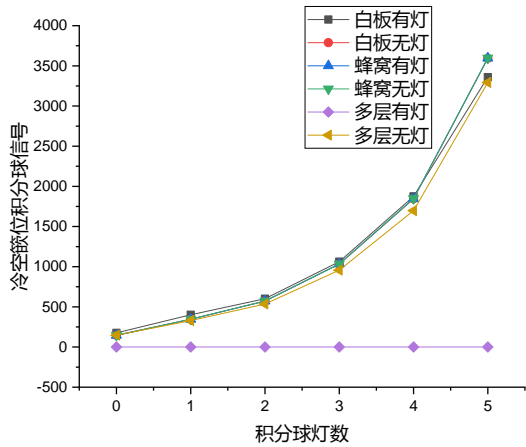


图9 积分球信号  
Fig. 9 Integrating sphere signal

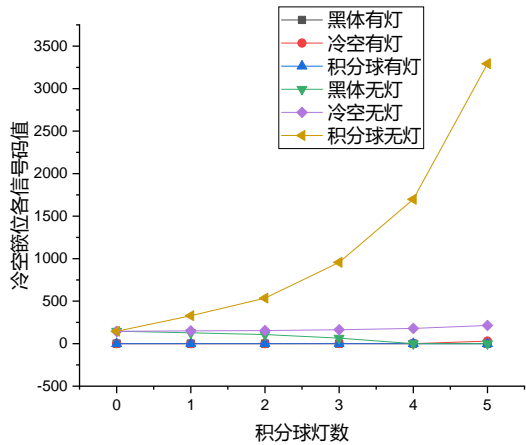


图10 多层包扎的影响  
Fig. 10 The influence of multi-layer dressings

### 3 冷空信号异常机理分析

由于太阳同步轨道中太阳和卫星的相对位置关系,太阳光不可能直射进入水色仪冷空开口处,产生这种现象的可能性是在冷空位置有异常强杂散光辐射进入水色仪工作光路的直流恢复区域。较大的可能是太阳经地物辐射进入到冷空附近区域,经过高反射率的未知实体反射进入水色仪冷空区域,导致有地面目标辐射或太阳耀光<sup>[11-12]</sup>被反射进入直流恢复位置,从而造成冷空基准信号受到干扰。针对10个冷空采样点的码值逐渐变大的趋势,应与未知实体的位置、形状以及与水色仪的相对角度有关。

为了抑制杂散光,水色仪在视场边缘两侧设置有遮光罩。假如未知镜面反射物体依附于水色仪遮光罩某处,建立如图11所示的光路模型。设镜面反射物体与直流恢复的方向夹角为 $\phi$ ;直流恢复方

向与天地连线的夹角为 $\gamma$ ;镜面反射物体的反射光线方向应沿直流恢复方向进入直流恢复视场位置,从而镜面反射物体的入射角和出射角 $\theta_1$ 为确定值,即 $\pi/2 - \phi$ ;太阳的辐亮度为 $E_s$ ;太阳光到达海面的透过率为 $\eta$ ;太阳反射光到达水色仪入瞳的透过率为 $\epsilon$ ;天顶角(太阳光入射角)为 $\theta$ ;入射光束在海面的投影面积为 $A_0$ 。

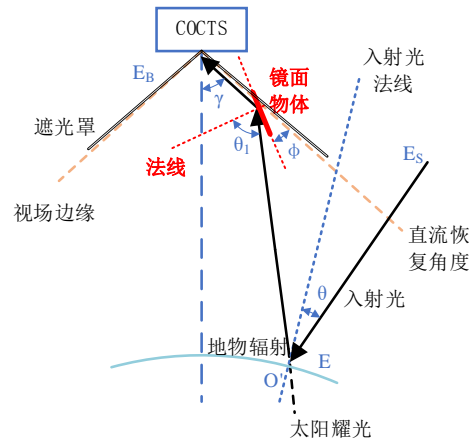


图11 地物辐射对B星水色仪的影响  
Fig. 11 The influence on HY-1B COCTS of the sun glitter

由菲涅尔定律可得太阳耀光到达B星水色仪直流恢复处的辐亮度计算公式如下<sup>[13]</sup>:

$$E_B = \epsilon \eta E_s A_0 \cos \theta \quad (2)$$

$$E_{B0} = \epsilon \eta E_s A_0 \cos \theta \cos \theta_1 \quad (3)$$

式中, $E_B$ 为目标到达大气层顶的辐亮度; $E_{B0}$ 为冷空处的辐亮度; $E_s$ 为太阳的辐亮度; $A_0$ 为入射光束在海面的投影面积; $\eta$ 为太阳光到达海面的透过率; $\epsilon$ 为太阳反射光到达水色仪入瞳的透过率; $\theta$ 为天顶角(太阳光入射角); $\theta_1$ 为由镜面反射物体的位置和相对角度确定的入射光线的入射角。

B星水色仪的系统响应系数 $\alpha_B$ ,已经包含了大气透过率 $\epsilon$ 和 $\eta$ 的影响。将(2)和(3)代入式(1)可得B星水色仪实际获取的耀光信号码值为:

$$N_B' = \alpha_B E_s A_0 \cos \theta (1 - \cos \theta_1) + \beta_B \quad (4)$$

即:

$$N_B' = \alpha_B E_B (1 - \sin \phi) + \beta_B \quad (5)$$

式中, $N_B'$ 为B星水色仪实际获取的耀光信号码值; $\alpha_B$ 为B星水色仪的系统响应系数, $\beta_B$ 为B星水色仪系统响应暗电平,二者均通过发射前的地面辐射定标实验得到,如表4所示为各通道第1像元的系统响应系数; $\phi$ 为镜面反射物体与直流恢复方向的夹角。

可以看出,如果冷空位置存在一个疑似镜面反射的载体,B星水色仪获取的冷空处耀光信号的大小和太阳天顶角 $\theta$ 的余弦呈正相关,并且受到镜面反射物体与直流恢复方向夹角 $\phi$ 的影响。因此需要修复的量应与其呈负相关,这与在轨冷空信号的变化规律以及实验室验证结果相吻合。

表4 B星水色仪系统响应系数

Table 4 System response coefficient of HY-1B COCTS

探测元	响应系数 $\alpha_B$	暗电平 $\beta_B$	相关系数
CH11A	73.152 89	15.347 48	0.993 9
CH11B	73.421 44	15.352 42	0.994
CH21A	73.637 7	17.268 04	0.993 3
CH21B	73.529 41	17.235 29	0.993 4
CH31A	79.428 12	14.670 37	0.993 1
CH31B	80.064 05	14.675 74	0.993 2
CH41A	79.554 49	16.618 93	0.992 9
CH41B	79.808 46	16.600 16	0.993
CH51A	83.472 45	18.305 51	0.991 7
CH51B	82.781 46	18.278 15	0.991 7
CH61A	92.592 59	17.481 48	0.992 4
CH61B	92.764 38	17.467 53	0.992 5
CH71A	97.943 19	14.681 68	0.993 7
CH71B	98.135 43	14.671 25	0.993 8
CH81A	170.765	17.486 34	0.996 5
CH81B	170.998 6	17.458 96	0.996 5

其中,CH<sub>m</sub>nA和CH<sub>m</sub>nB分别为第m通道第n像元对应的K镜A面和B面工位。

#### 4 数据修复算法

2018年发射的C星水色仪可见近红外探测通道的波段中心波长设置与B星相同,而且均为由北到南降轨成像。排除云层和大气等的影响,耀光到达大气层顶即水色仪入瞳的辐射量,只与耀光处所对应的太阳天顶角有关。因此,对B星和C星水色仪同一光谱探测通道相同天顶角的太阳耀光能量可认为相同,由此可建立可行的数学物理模型,通过C星水色仪观测到的太阳耀光能量数据与太阳天顶角的关系,可用于对B星水色仪不同天顶角时的耀光能量进行计算。根据耀光能量与表4对应的定标系数可以计算得到B星耀光理论上应该达到的码值,与实际得到的B星耀光信号码值相比较,得到不同耀光能量需要的修复量,分析并计算修复量的修复公式及其系数,最终用于所有区域地物目标包括

海域信号的修复。

#### 4.1 耀光形成机理及C星能量计算

C星与B星水色仪耀光信号的产生机理相同,都是基于太阳入射与水色仪观测在特定的海面区域形成镜面反射产生的,具体的产生机理示意如图12所示。当水色仪与太阳位于观测表面法线两侧且观测水面时产生耀光信号,除了观测波段外,耀光信号的大小只与天顶角 $\theta$ 有关。

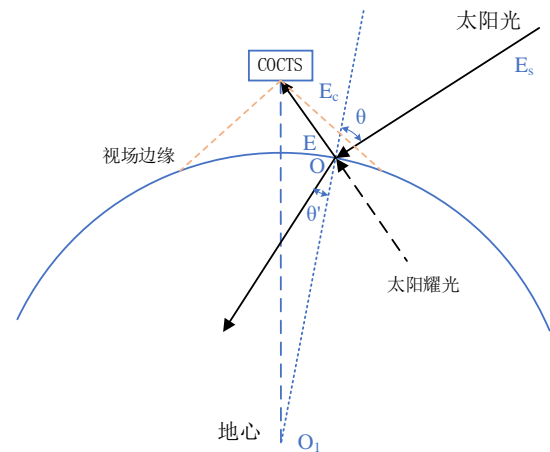


图12 耀光影响示意图

Fig. 12 Diagram of the glitter influence

耀光信号获取像素的判断依据是入射角与反射角之差不大于 $10^{-4}$ 弧度,太阳入射角根据星下点地理经纬度以及过境时间加以计算。由于到达地球表面的太阳光张角很小,在星下点与耀光区域太阳入射光可以认为是平行光。而观测角与水色仪相对于星下点的扫描角、观测点的地心角以及轨道高度和地球半径有关,可以通过固定的几何关系计算得到。

排除云层和大气的干扰,以反射观测点为中心,左右各取10个像素点,取均值作为C星水色仪的耀光信号 $N_C$ ,B星水色仪的耀光信号 $N_B$ 获取方法相同。C星水色仪由于没有B星水色仪的在轨光污染,耀光能量的计算公式为:

$$E_C = \alpha_c * N_C + \beta_c \quad (6)$$

式中 $E_C$ 为C星水色仪得到的耀光信号能量, $N_C$ 为C星水色仪耀光信号码值, $\alpha_c$ 和 $\beta_c$ 为在地面获取的C星水色仪辐射定标系数。

通过卫星下传的轨道参数和时间,可以得到星下点的太阳天顶角。根据对C星水色仪在轨将近300景目标的耀光能量进行计算,获得了8个通道的耀光能量与太阳天顶角 $\theta$ 的对应关系,如图13所

示,对应的回归系数如表5所示。

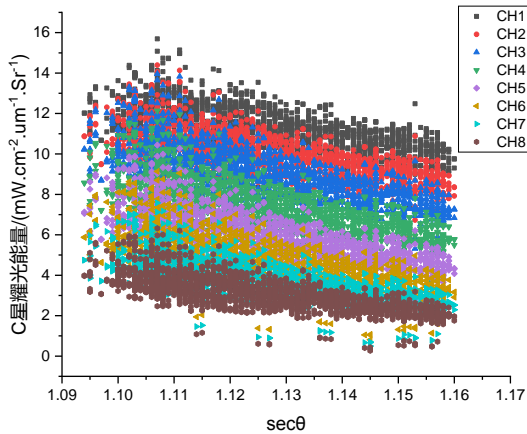


图13 C星水色仪耀光能量与天顶角的关系

Fig. 13 The relationship between the glitter energy and zenith angle for HY-1C COCTS

表5 C星耀光回归系数

Table 5 Regression coefficient of the glitter of HY-1C COCTS

通道	斜率 $k$	截距 $b$	相关系数
1	-3.448 578	6.301 199	-0.675 223
2	-4.269 947	7.101 911	-0.708 497
3	-5.756 909	8.673 079	-0.740 943
4	-6.828 983	9.679 126	-0.739 072
5	-8.133 145	10.919 994	-0.741 929
6	-9.904 326	12.693 466	-0.738 442
7	-10.365 134	12.987 391	-0.744 667
8	-11.085 599	13.601 824	-0.742 428

可以得出C星水色仪入瞳处的耀光能量与天顶角的关系满足公式:

$$E_c = k * x + b \quad (7)$$

$k$ 和 $b$ 分别为响应的斜率和截距,而自变量 $x$ 为 $\sec \theta$ , $\theta$ 为太阳天顶角。

同理,B星水色仪在不同太阳入射角时的耀光能量 $E_b$ ,也应满足公式(7),即:

$$E_b = k * x + b \quad (8)$$

#### 4.2 B星数据修复公式及修复过程

##### (1)理论分析

假设B星水色仪自身响应率没有发生变化,根据发射前辐射定标的响应率数据计算B星水色仪耀光信号实际应该达到的码值 $N_B$ ,减去实际获取的信号码值 $N_B'$ ,即为需要修正的B星水色仪信号码值 $N_d$ 。结合公式(1)和公式(5),则有:

$$N_d = N_B - N_B' = \alpha_B E_c + \beta_B - \alpha_B E_c (1 - \sin \phi) - \beta_B$$

$$= \alpha_B E_c - \alpha_B E_c (1 - \sin \phi)$$

即:

$$N_d = \alpha_B \sin \phi E_c \quad (9)$$

其中, $N_d$ 为需要进行能量修正的信号码值, $N_B$ 为B星水色仪耀光信号实际应该达到的码值, $N_B'$ 为B星水色仪耀光信号实际达到的码值, $\alpha_B$ 和 $\beta_B$ 分别为表4中B星水色仪系统响应系数和暗电平, $\phi$ 为镜面反射物体与直流恢复方向的夹角。此处认为理想的冷空为零辐射,即冷空处的辐亮度 $E_{B0}$ 为0。

由上式可知修复量与镜面反射物体的位置及相对角度特性相关。因为直流恢复处的光污染直接影响的是水色仪辐射基准,因此对在同一扫描线上所有像素点对应目标的影响是完全相同的,所以 $N_d$ 既是耀光信号的修正量,也可以作为当前扫描行上冷空信号、黑体信号以及其他地球区目标信号的修正量。

可将式(9)表示为:

$$N_d = \alpha_{BE} E_c \quad (10)$$

式中 $\alpha_{BE} = \alpha_B \sin \phi$ ,定义为能量修复系数。

虽然 $\phi$ 的值是未知的,但是镜面反射物体在轨的相对位置应为固定不变的,即 $\phi$ 为确定量,因此各探测元的能量修复系数 $\alpha_{BE}$ 也为确定值。为了确定各探测元的 $\alpha_{BE}$ 值,对B星水色仪在轨获取的数据进行统计分析。

##### (2)数据统计分析

由式(8)可以计算出B星水色仪在不同太阳天顶角时的耀光能量值,并可根据公式(1)计算得到不同能量的太阳耀光所对应的信号码值。以通道4第1探测元在K镜A工位为例,按表4中的地面辐射定标的系统响应系数,可以得到太阳耀光理论上应该达到的信号码值:

$$N_{41A} = \alpha_{41A} * E_B + \beta_{41A} \quad (11)$$

其中, $N_{41A}$ 为通道4第1元A工位时的太阳耀光输出的信号码值; $\alpha_{41A}$ 和 $\beta_{41A}$ 为表4中的CH41A对应的系统响应系数, $\alpha_{41A} = 79.554 49$ , $\beta_{41A} = 16.600 16$ 。如图14所示。

B星水色仪CH41A在轨实际获得的太阳耀光信号的码值如图15所示。由图可知,由于受到云层、大气等外围因素的影响,相同的太阳耀光能量输出的码值在一定的范围内分布。

为了得到图14的理论信号码值,需要增加一定的数据码值修正量。由图14和图15的数据之差即可计算出实际需要修复的码值量,如图16所示。



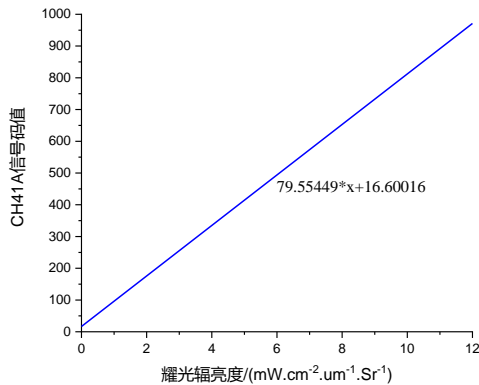


图 14 B星水色仪CH41A理论输出信号码值

Fig. 14 The theoretical output code of CH41A of HY-1B COCTS

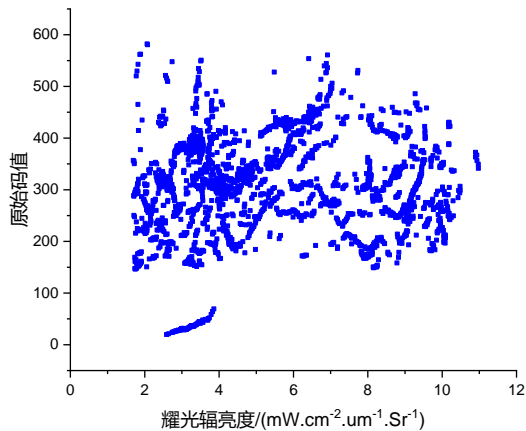


图 15 B星水色仪CH41A实际输出信号码值

Fig. 15 The actual output code of CH41A of HY-1B COCTS

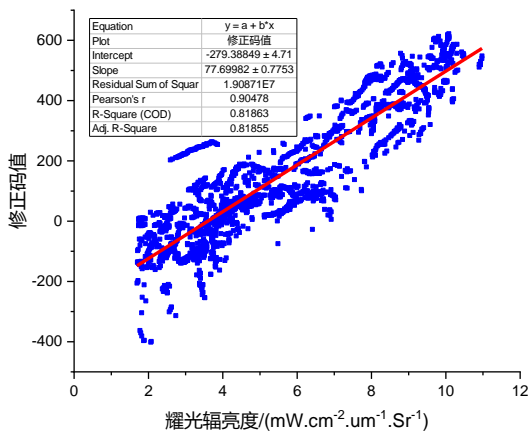


图 16 码值修正量

Fig. 16 Code correction quantity

由图 16 可知,排除云层、大气等因素干扰的情况下,修正码值与根据太阳天顶角计算得到的辐射量呈较好的线性关系,这与公式(10)所描述的线性关系相符,也为建立修正模型提供了依据。

但是由于实际耀斑信号获取时不可避免地受

到云层、大气等因素的影响,最终导致实际的修正数据也存在较大的离散。为了获取较为合理的修正系数,对上述数据进行线性拟合,得到的CH41A的修正公式为:

$$N_{41A} = 77.69982 \cdot E_B - 279.38849 \quad (12)$$

根据公式(10)所描述的修正量公式,理论上截距应为零。实际存在一定截距的原因有两点:一是发射前的辐射定标时的最高能级普遍低于水色仪的动态范围,根据以往在轨测试过程中的真实性验证结果,地面辐射定标的响应系数偏低,造成理论计算的码值偏低;二为太阳耀光观测区域普遍有云的覆盖,造成B星水色仪实际的耀斑信号码值偏大;两种因素造成了较大的负截距值存在。对B星水色仪修复之后的数据进行反演时,截距值的存在只是增加一个偏移量,不影响水色仪的线性响应。在后续星星交叉定标过程中可将此偏移量进行修正,在后续图像数据的修复过程中,仅采用修正公式(12)中的斜率系数,与理论计算公式(10)相一致。

水色仪可见近红外的8个通道,各包含4个探测元,考虑到K镜光学消像旋的A和B两个工位,每个探测元均有两组各自的修复数据码值与目标辐射亮度所对应的函数,可表示为:

$$N_{mnA/B} = \alpha_B'' \cdot E_B + N_B'' \quad (13)$$

其中, $N_{mnA/B}$ 为第 $m$ 通道第 $n$ 元A/B工位的码值修复量, $\alpha_B''$ 为能量修复的斜率系数, $N_B''$ 为能量修复的截距系数。

此函数关系为确定的, $\alpha_B''$ 和 $N_B''$ 可通过上述数据统计分析的手段获得,且不随图像的变化而变化,在进行各探测元的图像修复时依据此函数进行。

其中,获得的第1至第8通道第1元的修正系数如表6所示。

其中,CHmnA和CHmnB分别为第 $m$ 通道第 $n$ 像元对应的K镜A面和B面工位。从表6可以看出,对于B星水色仪可见近红外探测通道在轨光污染的数据修正,主要来自于太阳天顶角所决定的地球光照区的太阳能量影响的修正。

整个计算过程涵盖了B星水色仪9年的耀光数据统计结果,与能量相关的修正量进一步说明了B星水色仪在轨光污染的“源”是来自地球目标的太阳反射。

### 4.3 图像修复

通过上述修正系数,即可对B星水色仪所有在

表6 B星水色仪8通道第1探测元修复系数

Table 6 1st pixel's repair coefficient of 8 channels of HY-1B COCTS

探测元	能量修复系数		
	斜率 $\alpha_B$ "	截距 $N_B$ "	相关系数
CH11A	57.95	-188.486	0.843
CH11B	58.591	-195.259	0.842
CH21A	63.424	-297.407	0.849
CH21B	63.602	-300.908	0.849
CH31A	73.859	-333.964	0.893
CH31B	75.369	-345.69	0.89
CH41A	77.7	-279.389	0.905
CH41B	78.153	-280.332	0.905
CH51A	82.999	-237.105	0.912
CH51B	83.294	-243.694	0.911
CH61A	93.763	-164.48	0.923
CH61B	94.816	-170.759	0.922
CH71A	173.544	-154.908	0.967
CH71B	174.693	-160.589	0.965
CH81A	354.823	-161.201	0.982
CH81B	356.442	-168.427	0.981

轨可见近红外地物目标数据进行修复,过程如下:

(1)修复对象为B星水色仪的1A级产品,包含了时间、星下点太阳天顶角等修复需要的信息;

(2)获取太阳天顶角与日地距离,计算对应的能量,根据各探测元的能量修复公式计算与能量相关的修复量。

由于B星水色仪实际处于受光污染的状态,而数据修复是在现有基础上、为了体现光污染必然导致信号下降这一客观事实而进行的相对修复;并且修复后的图像数据需要由相关机构进行后续的重定标和定量化反演,所以修复过程仅使用了表6中的斜率系数。

根据推算结果,选取2008年2月15日水色仪拍摄的我国东南沿海可见近红外的8个波段的图像进行逐行修复,修复前后图像的第1164像素(列)的曲线如图17所示。修复前后图像的第1840扫描行的曲线如图18所示。由修复曲线可知,纬度越低,越靠近赤道,需要修复的量越大;相反,纬度越高,需要修复的量越小。

为了更好地区分海洋和陆地特征,将波段8、波段5、波段2分别对应R、G、B,对修复前后的图像进行合成,如图19所示。我国位于北半球,在2月份正常的情况下,纬度越低地物辐射应该相对越亮,而图a)修正前的原图上,由于辐射基准受到地物辐

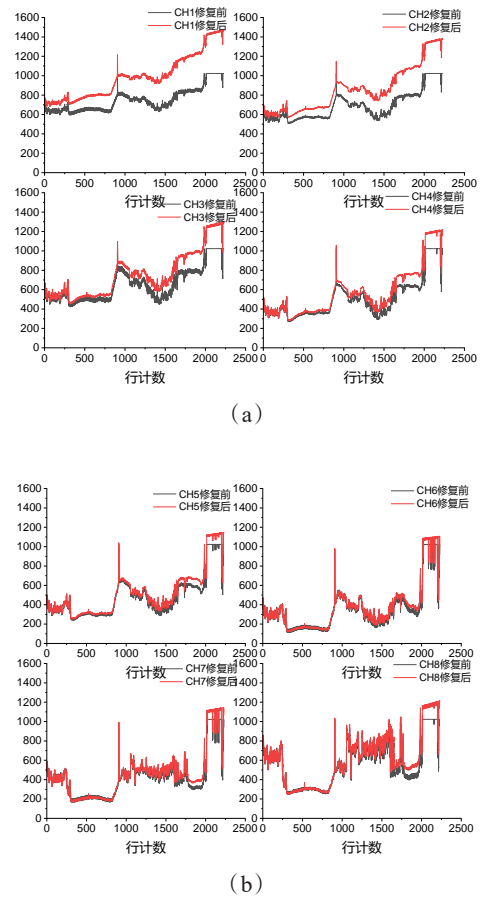


图17 修正前后图像曲线(第1164像素)(a)通道1~4,(b)通道5~8

Fig. 17 Image curve before and after correction(No.1164 pixel)(a) channel 1~4,(b) channel 5~8

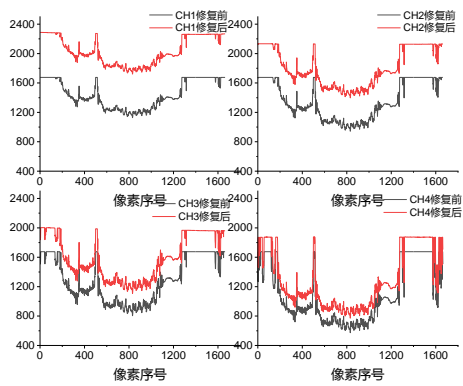
亮度干扰的原因,实际获取的南北地域图像的亮度并没有明显差异;修正后的图b)能够较为准确地体现南北地域地物目标辐亮度的差异,自北向南有逐渐变亮的趋势。对渤海、黄海区域进行放大比较,如图20所示;对修正前后的码值分布进行统计,如图21所示。

由图20和图21可知,修复后的图像码值有一定幅度的增加,以B1至B4表现较为明显。

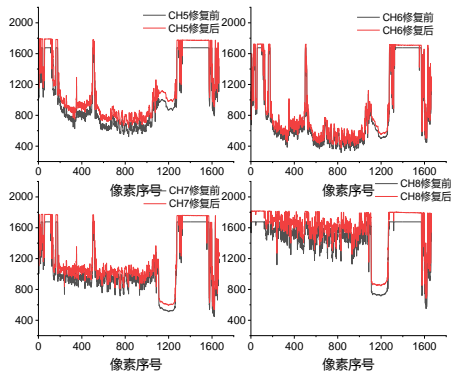
## 5 结语

从B星水色仪可见近红外探测通道出现的现象:黑体及部分深海区域近红外通道出现信号截止、冷空信号远大于发射前设置的暗电平码值,可以确定B星水色仪在轨冷空采样及直流恢复位置受到了较强的、不明原因的、非稳定的光学污染,最终导致无法进行海色三要素产品的反演。

通过对在轨冷空信号变化规律的分析,初步确



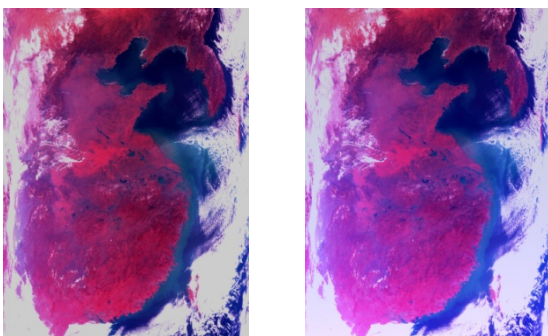
(a)



(b)

图 18 修正前后图像曲线(第 1840 行)(a) 通道 1~4, (b) 通道 5~8

Fig. 18 Image curve before and after correction (No. 1840 frame)(a) channel 1~4, (b) channel 5~8



(a)

(b)

图 19 图像修正(a) 修正前图像, (b) 修正后图像

Fig. 19 Image correction(a) image before correction, (b) image after correction

定 B 星水色仪冷空位置存在一个相对稳定的镜面反射载体, 将来自地球的目标辐射或者太阳耀光反射进入直流恢复视场。利用 B 星水色仪工程样机对在



(a)



(b)

图 20 渤海、黄海区域图像修正(a) 修正前图像, (b) 修正后图像

Fig. 20 Image correction of the Bohai Sea and the Yellow Sea area(a) image before correction, (b) image after correction

轨这一现象进行了实验验证, 分别采用蜂窝、99% 的漫射率白板以及卫星常用的多层包扎作为冷空处的目标仿真, 采用氙灯模拟太阳直射光、积分球仿真地球辐射。结果表明, 多层包扎作为冷空处的目标时, 积分球和氙灯照射下水色仪可见近红外通道的测试结果与在轨现象最为符合。

基于对在轨冷空信号规律与实验结果的分析, 得出冷空处如果存在多层包扎时, 来自地球的反射光辐射以正比于太阳天顶角余割函数的规律影响冷空信号的结论。以 C 星水色仪耀光信号对应的能量对 B 星水色仪的耀光信号进行修正, 得到修正量的相对值与理论分析能够较好地吻合; 由此建立模型并得到的修正系数可用于 B 星水色仪可见近红外波段在轨数据的修正, 并可用于历史数据的再定标和海洋水色等海洋要素的反演。

References

[1] Jiang X W, Lin M S, Zhang Y G. Progress of China Ocean satellite and its application[J]. *Journal of Remote Sensing*, (蒋兴伟, 林明森, 张有广. 中国海洋卫星及应用进展.

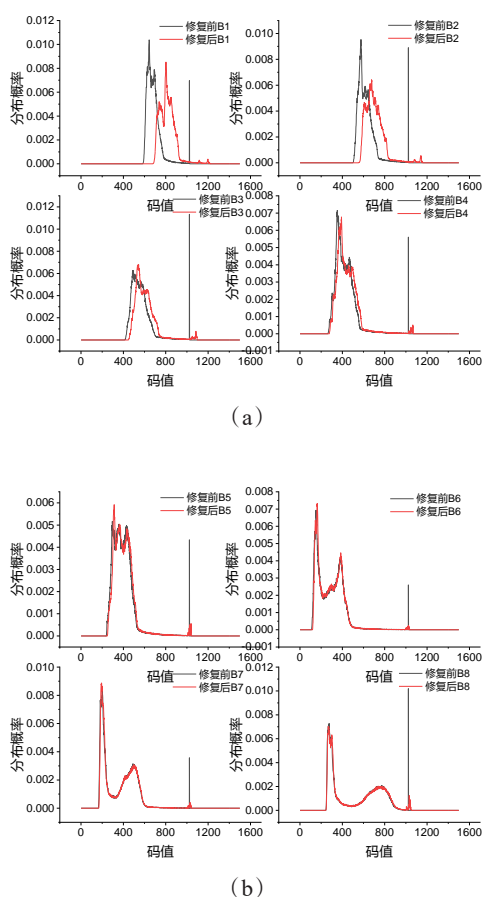


图21 图像码值分布(a)通道1~4,(b)通道5~8

Fig. 21 Image code distribution(a) channel 1~4, (b) channel 5~8

遥感学报)2016, 20(5): 1185-1198.

- [2] Pan D L, Wang D F. Advances in the science of marine optical remote sensing application in China[J]. *Advances in Earth Sciences*, (潘德炉, 王迪峰. 我国海洋光学遥感应应用科学研究的新进展. *地球科学进展*)2004, 19(4): 506-512.
- [3] National Satellite Ocean Application Service. Summary Report on in-orbit test of HY-1C satellite[R], (国家卫星海洋应用中心.“海洋一号C”卫星(HY-1C)在轨测试总结报告[R].2018.
- [4] Gu S Y, Wu R H, You R. Analysis and correction of FY-3A/MWHS cold space measurements influenced by the moon[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, (谷松

岩, 吴荣华, 游然. FY-3A/MWHS冷空测值受月球影响分析及修正. *应用气象学报*)2015, 26(4): 442-450.

- [5] Zhang E, Chen S S, Zhang L Y. The phenomena of lunar observation in cold space reference sampling area of Visible and Infrared Radiometer on FY-3 Meteorological Satellite [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, (张铎, 陈帅帅, 张里阳. FY-3气象卫星可见光红外扫描辐射计冷空间基准采样区观测到月球后的现象. *红外与毫米波学报*)2020, 39(6): 802-809.
- [6] Wang M, Shi W, Jiang L, et al. NIR-and SWIR-based on-orbit vicarious calibrations for satellite ocean color sensors[J]. *Optics Express*, 2016, 24(18), 20437-20453.
- [7] Zhang M W, Tang J W and Ding J. Discussion on zero-level drift correction method of ocean color sensor[J]. *J. Infrared Millim, Waves*, (张民伟, 唐军武, 丁静. 海洋水色传感器零电平漂移校正方法探讨. *红外与毫米波学报*) 2009, 28(5): 376-381.
- [8] Feng Q, Zhang S M, Zheng L H. Design and on-orbit performance evaluation of water color scanner for China ocean-1 satellite[J]. *Spacecraft Engineering*, (冯旗, 张恕明, 郑列华, 等. 中国海洋一号卫星水色扫描仪设计与在轨性能评估. *航天器工程*)2003, 12(3): 47-55.
- [9] Zheng L H, Yin D Y, Feng X. Application of K-mirror image-rotating eliminating mechanism in ocean satellite water color scanner[J]. *Infrared Technology*, (郑列华, 尹达一, 冯鑫. K镜消像旋机构在海洋卫星水色仪中的应用. *红外技术*)2007, 29(1): 17-21.
- [10] Teillet P, Fedosejevs G, Gauthier R, et al. Radiometric Calibration of Multiple Earth Observation Sensors Using Airborne Hyperspectral Data at the Newell County Rangeland Test Site[J]. *Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering*, 1999, 3750 (02): 470-481.
- [11] Chen X F, Gu X F, Cheng T H, et al. Simulation and Analysis of Polarization Characteristics for Real Sea Surface Sun glint[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, (陈兴峰, 顾行发, 程天海, 等. 真实海洋表面的太阳耀光偏振辐射特性仿真与分析. *光谱学与光谱分析*)2011, 31(6): 1648-1653.
- [12] Kudryavtsev V, Yurovskaya M, Chapron B, et al. Sun glitter imagery of ocean surface waves. Part 1: Directional spectrum retrieval and validation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(2): 1369-1383.
- [13] 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.