

冷空异常下热红外波段再定标及非均匀校正

瞿洋^{1,2,3}, 黄小仙^{1,3*}, 冯旗^{1,2,3*}

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外与成像技术重点实验室, 上海 200083;
2. 上海科技大学 信息科学与技术学院, 上海 200083;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 海洋一号B星水色水温扫描仪(HY-1B COCTS)在轨工作时受到冷空未知辐射的干扰导致其九年数据均受到不同程度的影响。以两极受影响较小的数据做样本,建立基于再定标系数的响应修复模型和基于概率分布的非均匀校正模型,对地球目标信号进行修复,根据修复结果进行了对比和优化,并对修复模型的精确性和稳定性进行了验证。最后结果表明,在冷空辐射基准受影响的情况下,响应修复模型结合概率分布校正模型能够明显的对数据进行有效修复。

关键词: 红外遥感; 冷空异常; 再定标; 非均匀校正

中图分类号: TP722.5 **文献标识码:** A

Re-calibration and nonuniform correction of thermal infrared band under cold space abnormal

QU Yang^{1,2,3}, HUANG Xiao-Xian^{1,3*}, FENG Qi^{1,2,3*}

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

Abstract: Chinese ocean color and temperature (COCTS) was interfered by the unknown radiation of cold space when the satellite of HY-1B was in orbit, which causes its nine-year data to be affected to varying degrees. Using data with less impact on the two poles as samples, the response repair model based on recalibration coefficients and the non-uniform correction model based on probability distribution were established to repair the earth target signal, and the repair results were compared and optimized. The accuracy and stability of model were verified. The final results show that under the condition of the cold space radiation benchmark affected, the response repair model combined with the probability distribution correction model can obviously repair the data effectively.

Key words: infrared remote sensing, cold space abnormal, re-calibration, nonuniform correction

PACS: 42. 79. Qx, 07. 05. Pj

引言

海表温度对于气候水文观测、生态资源探测和自然灾害监测等有着重要的意义。我国是一个海洋大国,建设海洋强国是中国特色社会主义事业的重要组成部分。在近20年的时间里,我国先后发射了四颗海洋一号系列遥感卫星。其中HY-1B于

2007年发射升空,在2015年才停止工作。其上搭载的载荷COCTS在轨工作九年积累了大量的海洋遥测数据,其第9、第10波段为热红外波段,可用于海表温度的探测。因冷空间可看作绝对温度为4 K的黑体,所以COCTS以冷空作为热红外波段的零辐射基准。

收稿日期: 2021-02-09, 修回日期: 2021-09-03

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

Foundation items: Supported by the National Key R & D Program of China (2018YFB0504900, 2018YFB0504904)

作者简介(Biography): 瞿洋(1994-), 男, 陕西省汉中市人, 硕士, 主要从事数字图像处理的研究。 E-mail: sfczry@163.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: huangxiaoxian@139.com, fengqi168@vip.sina.com

Received date: 2021-02-09, Revised date: 2021-09-03

但 COCTS 在轨工作时受到未知辐射的影响,导致仪器输出的地球目标信号小于真实值,九年的数据均受到不同程度的影响。有效修复被未知辐射污染的载荷辐射基准的事例并不多见。在早期的遥感发展中,美国对受影响的数据不做修复只进行标记,不建议用户后期应用。风云三号 A 星(FY-3A)在轨工作时,其上搭载的微波湿度计(MWHS)也以冷空作为辐射基准,在轨工作时就遇到了在某些时间观测冷空时会受到月亮反射的影响这一情况^[1-2]。太阳同步轨道卫星风云三号 C 星(FY-3C)的可见光红外扫描辐射计(CVIRR)在轨工作过程中,有遇到在高纬地区昼夜交替位置时太阳光直射进仪器内部的情况,导致每轨中都会有部分数据异常^[3]。美国军事气象卫星(DMSP)搭载的微波成像仪^[4](SSMIS)和国防卫星 Coriolis 上搭载的风场扫描仪^[5]也有遭受到类似的部分数据污染的情况。

在轨工作的卫星随着时间和环境的变化造成自身探测精度下降,更有甚者受到外来杂光等未知辐射的影响导致自身辐射基准发生改变,从而严重影响仪器输出信号,造成较严重的图像非均匀性。常用的非均匀性校正方法分为基于标定的方法^[6]、基于场景的方法^[7-8]和深度学习的方法^[9]。

本文针对 HY-1B COCTS 遇到的冷空异常问题,通过冷空信号阈值筛选出较高准确性的两极数据,对双波段共 8 元探测器 A/B 工位(对应 K 镜工作的两个状态,同元探测器 A/B 工位差异很小)分别建

立基于再定标系数的响应修复模型和基于概率分布的非均匀校正模型,对大量原始数据进行修复,并对修复结果和模型进行了评估。

1 方法

1.1 COCTS 工作原理

COCTS 是一台光机扫描式海洋遥感仪器,扫描镜作穿轨方向扫描,可先后对冷空、地球和头部参考黑体采样,借助卫星的绕地飞行获取地球的二维景象。K 镜用于消除 45°扫描镜产生的像旋。地球辐射经扫描镜反射进入主光学系统,主光学系统的出射光束经 K 镜消旋后通过两组分色片分成可见、近红外、热红外三路光束,分别成像于碲镉汞红外探测器和硅探测器上,由位于探测器前的微型滤光片形成各自的探测波段。探测器输出信号经前置放大、交流放大、通道放大后送给主控与信息处理电路进行 A/D 转换、格式编排、数据存储,再将水色仪格式数据读出后送数传分系统,其工作原理如图 1 所示。两个热红外波段的光谱范围分别为 10.3~11.4 μm 和 11.4~12.5 μm ,每个波段均有 4 元探测器。

COCTS 主体有一参考黑体,其温度可由埋入黑体的测温铂电阻进行测量,在地面红外定标时获得黑体温度与铂电阻输出信号的关系,在轨工作时利用冷空信号和参考黑体信号可实现红外通道的在轨实时校正(星上定标)。信息处理电路采用交流放大模式可以防止信号直流漂移,但它不能反映接

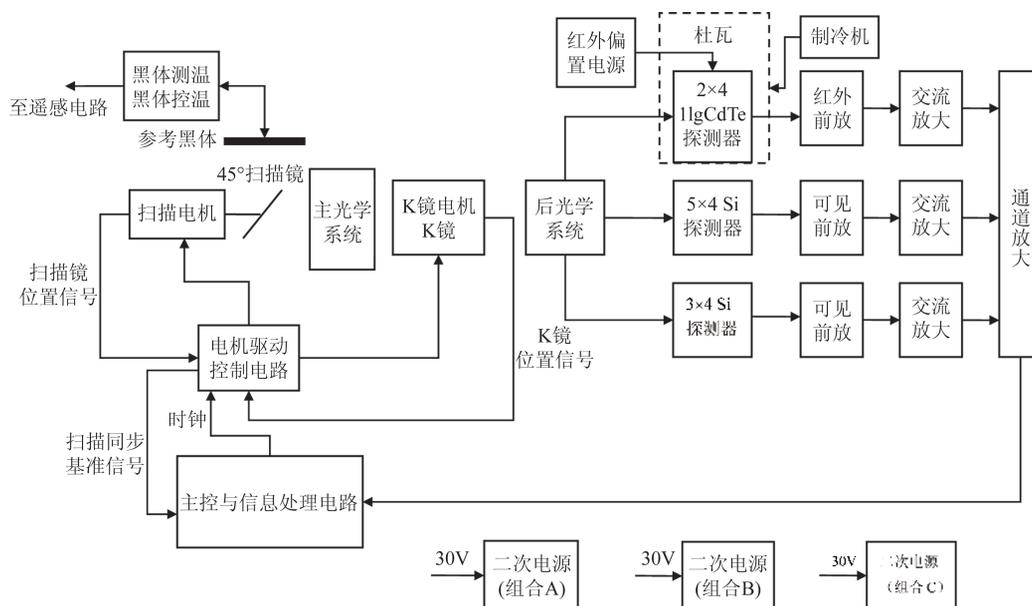


图 1 水色水温扫描仪工作原理图

Fig. 1 Working principle diagram of COCTS

收辐射的绝对大小,只能代表其相对变化,为了建立入射辐射与输出信号的关系,需要在冷空观测域对信号进行直流恢复,即将电平强行箝位至“零电平”,对应图2中冷空间直流恢复开始之处,其目的是为了确定冷空辐射基准,保证输出码值的绝对精度。理想的冷空可以视为COCTS每个360°扫描圈内的最小辐射,地球目标的辐射均不会低于冷空辐射。但如果此时有未知辐射进入,即冷空受到污染,则后续观测地球目标和黑体信号时会导致输出码值比实际真实值低,若未知辐射较强时,甚至会使目标有用信息处于截止状态,从而造成信息丢失。

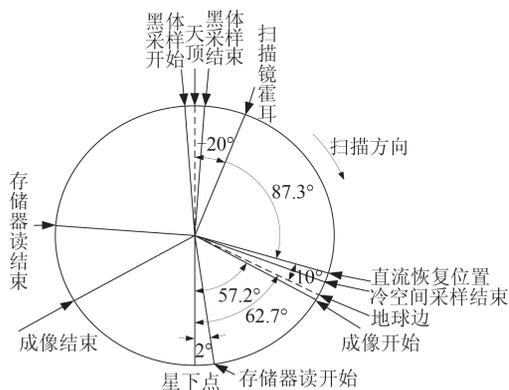


图2 HY-1B COCTS 360°扫描周期内电子学采样顺序
Fig. 2 Sample order of electronics during 360° scanning period of HY-1B COCTS

通过对大量的HY-1B/COCTS L0级数据进行预处理和分析,本文发现地球目标信号在中低纬度地区会出现明显下降而全部失效,且冷空信号在中低纬度地区变化异常,从0到95不规律波动,冷空信号码值极不稳定,刘军泉^[10]等在研究HY-1B/COCTS的可见光波段时亦发现这一现象。而在位于南北两极区域时,冷空信号码值变化幅度较小,整体稳定在20以下,平均值接近红外定标过程中确定的冷空码值(暗电平),与理想的冷空环境相近(例如,波段9第一元的暗电平为14.2,而两极处的冷空码值众数为14)。同样的,黑体信号在中低纬地区明显下降,两极地区抬升且趋于稳定。图3中展示了黑体信号、冷空信号随纬度变化的情况。综上,说明两极处的辐射基准偏移较小,遥感数据尚能使用。基于这一发现,本文利用受影响较小的两极数据,建立黑体-冷空之间的两点再定标关系,设计随时间变化的响应函数修复模型,并在此基础上设计了适用于HY-1B COCTS这一特殊情况的非均匀校正

模型,在码值和图像上进行二次修复。

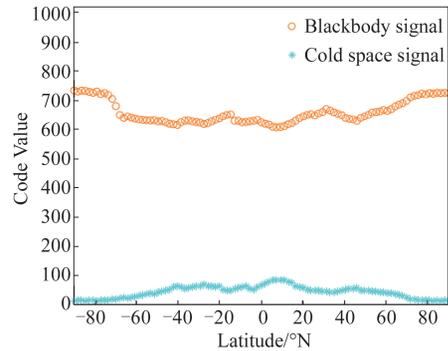


图3 黑体信号和冷空信号随纬度变化情况
Fig. 3 The variation of blackbody signal and cold space signal with latitude

1.2 响应修复模型

虽然冷空异常导致辐射基准发生变化,黑体信号失效不能反映真实的参考黑体辐亮度,但根据遥测数据中的两个测温铂电阻码值,可以得到参考黑体的实时温度,再由普朗克函数可以得到两通道各自的等效黑体温度和等效黑体能量,该过程不受冷空环境影响。COCTS红外探测通道设置了两点星上线性定标系统:冷空与黑体,冷空是辐射基准低端,黑体是高端。数据修复的机理是在黑体能量有效获取的基础上,利用随时间变化的再定标系数,就可以得到星上黑体修复之后的数据码值,与受污染情况下的码值相比较即可得到每一帧冷空污染量,将其叠加到地球目标信号上即可完成地球目标的修复。响应修复模型将受影响较小的两极数据作样本,利用头部参考黑体,基于黑体-冷空两点定标原理,重建了新的实时再定标关系,暨探测器探测到的在冷空背景下发热黑体辐射出的入瞳能量和对应的输出信号码值之间的线性关系。同时,根据COCTS在轨工作的稳定性和图像数据的清晰状况,我们认为其在轨工作过程中仪器灵敏度良好且稳定,不随时间剧烈变化,从而建立随时间分布的响应修复模型,用于修复非两极地区数据。包含以下几步:建立随时间变化的再定标系数 $\alpha(t)$,计算各点冷空污染量 ΔN ,修复各点地球信号码值并反演亮温。再定标系数 $\alpha(t)$ 可以表示为

$$\alpha(t) = (E_{pt} - E_s) / (\overline{N}_b - \overline{N}_s) \quad (1)$$

其中 $\alpha(t)$ 为新的定标系数,表征了辐射能量和输出码值之间的转换关系,既可以用于后文冷空污染量的计算从而修复地球目标数据,同时由再定标系数

和修复后的地球目标码值相乘即可得到对应的地球目标辐射能量,利用普朗克公式即可反演出入瞳处目标等效黑体温度, E_{pt} 为两个热红外波段各自的等效黑体辐射,由两个铂电阻所测的参考黑体码值对应的等效黑体温度计算而来; E_s 是冷空辐射,两极处的冷空受影响很小,冷空码值接近理想情况下的暗电平,其4 K温度对应的能量很低,几乎等于零。 $\overline{N_b}$ 为每元探测器10次黑体采样的黑体信号码值均值, $\overline{N_s}$ 为每元探测器10次冷空采样的冷空信号码值均值。两个铂电阻码值经由实验测得的转换关系可以得到两个通道各自的等效黑体温度,其公式为

$$T = \left(\sum_{i=0}^3 A_{i,0} \cdot DN_0^i + \sum_{i=0}^3 A_{i,1} \cdot DN_1^i \right) / 2, \quad (2)$$

式中 T 为第9、10热红外波段参考黑体对应的等效黑体温度, DN_0 和 DN_1 分别为测温铂电阻1和测温铂电阻2的输出码值, A_0 和 A_1 分别为铂电阻1和铂电阻2的转换系数。利用普朗克公式即可求解出每个波段各自的等效黑体能量,其表达式为

$$E_{pt} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) \cdot R(\lambda) d\lambda \\ = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(\exp(c_2/\lambda T) - 1 \right)} \cdot R(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

其中 $L(\lambda, T)$ 为黑体辐亮度, $R(\lambda)$ 为光谱响应函数。 $c_1 = 1.191042 \times 10^8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$, $c_2 = 1.4387752 \times 10^4 \text{ K} \cdot \mu\text{m}$, λ 为波段波长, T 为(2)式求得的等效黑体温度。对求解出的大量再定标系数 α 离散点做多项式拟合,找到定标系数随时间的变化关系,将其代入待修复区域的数据中,可得到冷空污染量, ΔN 可表示为

$$\Delta N = E_{pt} / \alpha(t) - \overline{N_b}, \quad (4)$$

其中 E_{pt} 是待修复数据黑体对应的等效黑体能量(认为是真值), $\overline{N_b}$ 为其探测到的受影响的黑体信号码值。待修复的非两极区域冷空辐射受到较大影响,能量不为零,但冷空信号码值与冷空能量是稳定对应的,在此处求解时已化简省去。将每元探测器各自的冷空受污染量加到地球目标信号码值上,即可实现数据的修复。

由于两个波段受冷空污染影响不同,同一波段的各元探测器之间的影响也不一样,所以需要针对性修复,图4展示了波段9第一元探测器A工位和波段10第四元探测器A工位的响应修复模型。图中展现了再定标系数和两个铂电阻码值均值随时间

的变化情况,并对其离散数据点进行了多项式拟合。从模型原理上讲, $\alpha(t)$ 是由黑体和冷空确定的,当冷空稳定时,再定标系数的波动规律应该与测量黑体温度的铂电阻码值的变化趋势保持一致,二者的变化趋势越同步、拟合曲线形状越相近,代表模型准确度越高,反之则说明受冷空异常影响较大。由于头部参考黑体在轨工作时处于变温状态,即使在同一轨中黑体温度也存在波动,所以二者的离散分布均呈现出上下波动形态。

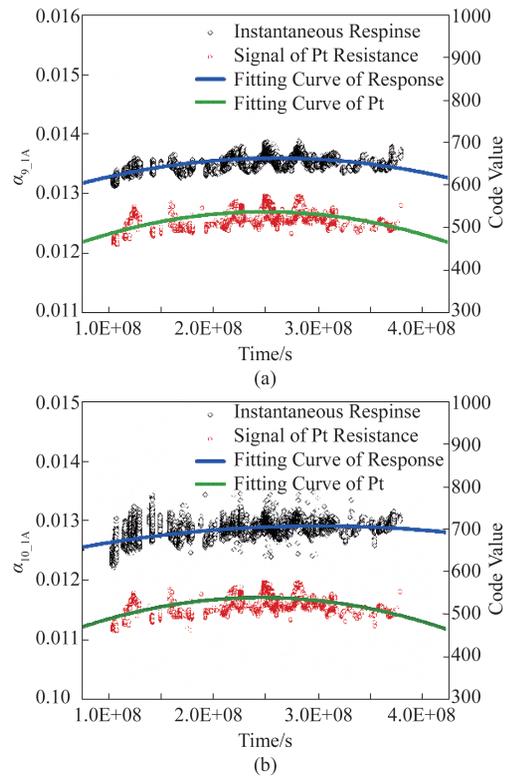


图4 响应修复模型再定标系数、铂电阻码值随时间的变化 (a)波段9第1元A工位拟合结果,(b)波段10第4元A工位拟合结果

Fig. 4 The variation relationship of recalibration coefficient and code value of Pt resistance with time for response repair model (a) Fitting result band 9 1st detector at A station, (b) Fitting result of band 10 4st detector at A station

1.3 非均匀校正模型

一方面,由于冷空异常对各元探测器所造成的影响并不相同,响应修复模型中确定的各元再定标系数也有差异,从而对各元探测器输出码值的修复精度并不一致,对于受影响小、两极冷空信号稳定的探测器其修复值更接近真实污染量,而对于影响较大、两极冷空信号不稳定的探测器,其修复值会小于真实污染量,因此需要从码值上进行二次修

复。另一方面,随着在轨工作环境的变化和时间漂移特性,红外探测器灵敏度会受到影响,不同的暗电流在冷空基准受影响不一致的加成下,COCTS对地球目标4元探测器并扫所成的图像非均匀性会被放大,因此也需要从图像上进行非均匀校正。综上,本文在基于再定标系数的响应修复模型基础上,设计了适用于HY-1B/COCTS这一特殊情况的非均匀校正模型,可同时在码值和图像上进行二次修复和校正。

非均匀校正模型包含以下几步:码值直方图统计,码值概率分布统计,各元码值概率分布配准。以一次扫描所成的地球图像数据为样本,分别提取该样本中各元探测器A/B工位成像的码值数据,并分别对每元探测器A/B工位的码值样本进行直方图统计,再统计其码值概率分布从1%~99%所对应的99个码值离散点,采用各通道稳定性最好的探测元作为该通道的标准元,分别以待修正元和标准元作为横纵坐标,在二维平面内对其概率分布码值进行线性拟合,最后用于码值二次修复和图像非均匀校正。图5为两波段各自的4元探测器A工位码值概率分布拟合,波段9各元探测器码值概率分布拟合接近,说明图像非均匀性不严重,成像稳定

2 分析与讨论

响应修复模型中再定标系数与星上黑体的能量辐射成正相关关系,而铂电阻测得的黑体温度码值是不受冷空未知辐射干扰的,所以再定标系数随时间的变化关系与铂电阻码值随时间的拟合曲线相关性越高,代表该元修复模型越精确和稳定。本文利用相关系数(COR)、残差平方和(SSR)以及冷空阈值(CST)对模型进行比较。

COR通过采样比较各元探测器再定标系数拟合曲线和铂电阻码值拟合曲线的差距来评价二者之间的关系,其计算公式为

$$\text{COR}(X,Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (5)$$

式中 \bar{x} 和 \bar{y} 分别是再定标系数和铂电阻码值采样样本的平均值。通常,COR值越大,代表二者相关性越高。SSR定义了样本变化范围的大小,其值越小,代表样本越汇聚,其公式为

$$\text{SSR} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (6)$$

模型结果如表1所示。在对各探测元进行建模

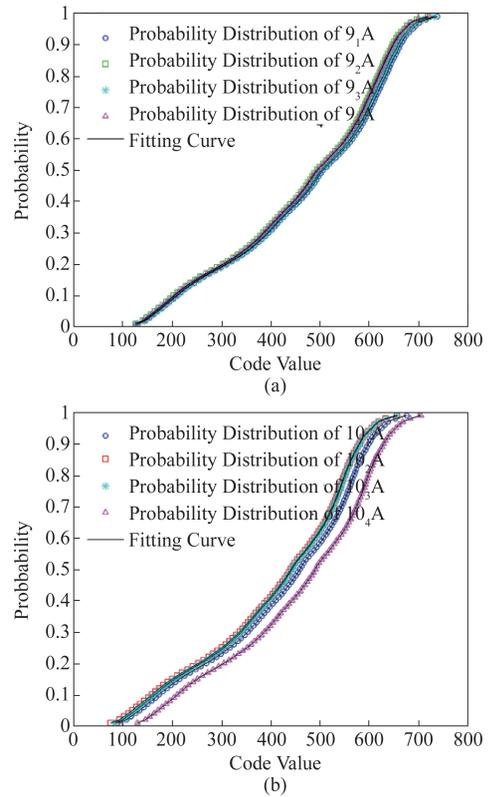


图5 非均匀校正模型概率分布(a)波段9探测元A工位概率分布,(b)波段10探测元A工位概率分布

Fig. 5 Probability distribution for nonuniform correction model (a) Probability distribution for band 9 detectors at A station, (b) probability distribution for band 10 detectors at A station

时,需要根据各自冷空信号的稳定程度筛选数据源。由表可知,各元探测器受冷空未知辐射影响均不相同,其中波段9第1元探测器受影响较小,COR为0.96,和铂电阻变化关系高度一致,波段10受影响情况较波段9严重,其中第4元相关性最高,第一元相关性最低,其原因是第一元的冷空信号一直为0,受影响情况最严重。波段10各元冷空信号码值整体偏低,因此数据样本源在选择上时降低了冷空阈值,从而使得模型准确度受到影响,波段9各元冷空阈值平均为14,波段10各元探测器冷空阈值平均为7。

由于冷空未知辐射对各元探测器影响情况均不相同,加大了红外图像条带之间的非均匀现象。通过选择效果最好的波段9第1元和波段10第4元作为各自波段的参考元,实现图像上的非均匀校正和码值上的二次修复。以波段9为例,其图像校正如图6。经响应修复后,图像非均匀性得到一定程度的改善,但其概率分布拟合仍有差异,说明非均

表1 双波段8元探测器响应修复模型参数

Table 1 Parameters for eight detectors of two bands of response repair model

Detector	9_1	9_2	9_3	9_4	10_1	10_2	10_3	10_4
Sample	141 522	81 718	131 138	68 654	175 645	132 676	174 765	127 178
COR	0.962 28	0.798 95	0.527 85	0.612 16	0.049 30	0.519 17	0.303 11	0.752 28
SSR	0.001 01	0.000 88	0.001 13	0.000 68	0.024 81	0.020 82	0.024 95	0.001 28
CST	14	14	14	14	0	7	7	7

匀性尚存。

为了客观反映图像非均匀校正前后的区别、评价图像校正后的质量,使用均方根误差(RMSE)和非均匀度(NU)定量地评价基于概率分布的非均匀校正模型的作用。RMSE的定义为:

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{M \cdot N} \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_{ij} - G_{ij})^2 \right]^{1/2}, \quad (7)$$

式中 M 和 N 分别代表图像分辨率,即水平方向和垂直方向的像素点个数; I_{ij} 表示为校正的原始图像各像素点的像素值, G_{ij} 表示校正后图像各像素点的像素值。均方根误差越小越好,通过 RMSE 可以求解峰值信噪比:

$$\text{PSNR} = 20 \lg \left(\frac{2^b - 1}{\text{RMSE}} \right), \quad (8)$$

式中 b 为图像像素值位数, HY-1B/COCTS 探测的图像数据为 10 bit 码值。PSNR 值越大,非均匀校正模

型的实际效果越好。

NU 的定义如下所示:

$$\text{NU} = \frac{1}{\overline{G_{ij}}} \left[\frac{1}{M \cdot N} \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_{ij} - \overline{G_{ij}})^2 \right]^{1/2}, \quad (9)$$

式中 $\overline{G_{ij}}$ 为图像校正后的均值,其余参数的意义与式 7 一致。NU 越小,非均匀校正模型的实际效果越好。

利用均方根误差和非均匀度对波段 9 和波段 10 非均匀校正图像分别进行计算,其结果如表 2 所示。

从表中数据来看,波段 9 的校正效果比波段 10 要好,这是因为波段 9 所成图像,相邻 4 行中各元探测器输出码值差异较小,图像性质稳定;波段 10 各行码值差异较大,校正前后整体码值增加较大, RMSE 本身就大。本文设计的基于码值概率分布的非均匀校正模型,其目的是针对经再定标系数修复

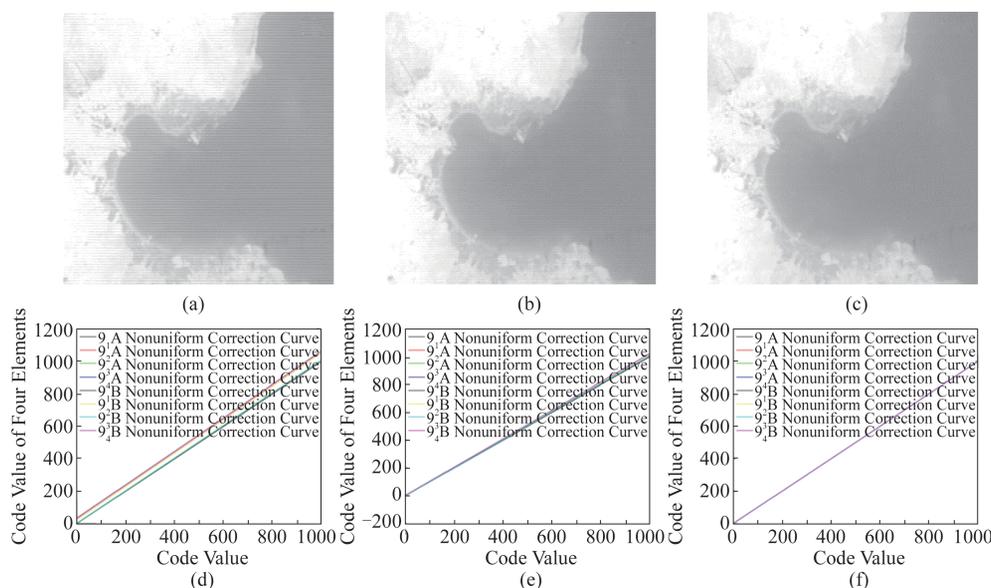


图6 波段9渤海湾图像非均匀校正和码值概率分布拟合曲线(a)原始图像,(b)修复图像,(c)修复校正图像,(d)原始图像各元概率分布拟合曲线,(e)修复图像各元概率分布拟合曲线,(f)修复校正图像各元概率分布拟合曲线

Fig. 6 Nonuniform correction and fitting curve of probability distribution of code value for band 9 image over Bohai Bay (a) Origin image, (b) repair image, (c) repair-correction image, (d) fitting curve of probability distribution of detectors for origin image, (e) fitting curve of probability distribution of detectors for repair image, (f) fitting curve of probability distribution of detectors for repair-correction image

表2 双波段8元探测器响应修复模型参数

Table 2 Parameters for eight detectors of two bands of response repair model

Method	Band_9	Band_10
PSNR	32	27
NU	0.061	0.098

后的数据,将除波段9第一元和波段10第四元外其它各元输出码值按照标准元输出码值的概率分布进行提升,本质原因是同一波段各元探测器即使有制造工艺的差异,但其输出结果理论上不会相差太多。该模型在针对码值的二次修复基础上,同时实现了图像上的非均匀校正。

3 评估结果

模型修复结果不仅要改善图像质量,校正非均匀性,更要在码值上对图像进行量化修复,为后端的用户使用保障准确性。为评估响应修复模型和概率分布校正模型对图像码值的修复作用,将从模型修复精确度和稳定性两方面进行验证。

精确度验证通过随机选取一张过境渤海湾的无云图像数据,分别按照经度变化方向(117.625°E~120.126°E, 38.725°N)、纬度变化方向(38.175°N~39.025°N, 115.219°E)对双波段渤海湾海域入瞳亮温(等效黑体温度)进行反演,并将结果与同一天英国气象局海域数据比较。图7为修复前后双波段入瞳亮温随经度、纬度变化关系。可以看出:波段9最终修复温度与来自英国气象局的数据温度平均相差2.865°C。这是因为一方面后者数据为中午12点的海域温度,而COCTS渤海湾遥测数据是在凌晨2点过境时探测的,存在昼夜温差;另一方面模型最终修复后的码值反演的温度均为入瞳亮温,没有进行大气衰减的校正,最终修复后的温度随经纬度变化趋势与英国气象局海域温度数据相吻合。波段9各元探测器之间受影响差距不大,响应修复模型发挥主要作用,从图6(b)、(e)也能看出,经过初次修复后码值概率分布拟合曲线趋于一致,图像非均匀性就得到很大的改善;波段10多元探测器受影响严重,非均匀校正模型对温度的修复更明显。波段9平均修复温度5.865°C,波段10平均修复温度6.124°C,两波段最终修复的温度平均相差1.826°C,说明波段10受影响情况确实比波段9严重,也说明了不同阈值的冷空信号样本对修复模型的精确度是有影响的。

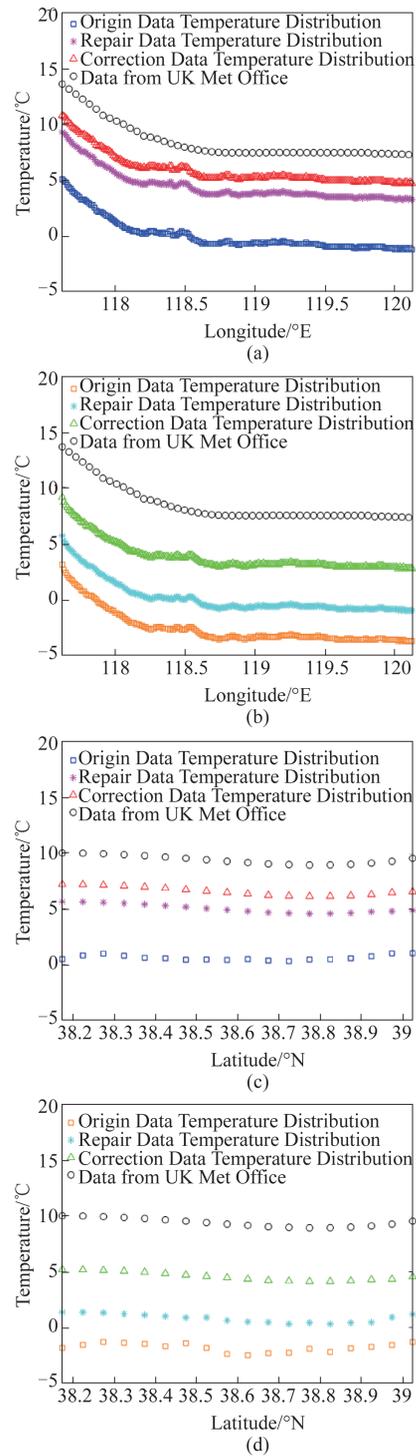


图7 波段9、10渤海湾海域温度随经纬度变化(a)波段9温度随经度变化,(b)波段10温度随经度变化,(c)波段9温度随纬度变化,(d)波段10温度随纬度变化

Fig. 7 Variation of temperatures as longitude and latitude for band 9 and 10 over the Bohai Bay (a) Variation of temperatures as longitude for band 9, (b) variation of temperatures as longitude for band 10, (c) variation of temperatures as latitude for band 9, (d) variation of temperatures as latitude for band 10

鉴于两波段之间修复结果有一定温度差异,需要对波段10修复模型进行优化。COCTS星上黑体主要成分为铝,其表面喷漆在两个热红外波长范围内的比辐射率均在0.86左右,两波段探测到的黑体辐射能量转换来的等效黑体温度基本一致。因此,模型优化可以建立在这一理论基础之上。在每一个扫描周期内,针对修复-校正后的最终结果,将铂电阻测温码值转化成两波段各自的等效黑体能量,根据实验室定标系数将两波段各自的等效黑体能量转化为冷空未受影响情况下的两波段各自的黑体信号值,即可视为9通道第一元探测器探测到的黑体信号值和10通道第四元探测器探测到的黑体信号值,二者之间的差值即为理想状态下两通道黑体信号差值。再将修复后的两元探测器实际黑体信号差值减去理想差值,即可得到波段10比波段9少修复的码值量,将其加到该帧10通道地球目标信号上,即可建立每个扫描周期内的波段9对波段10的码值补偿机制,实现对波段10修复模型的优化,确保波段10修复结果的精确度。

稳定性验证通过提取过境渤海湾区域的2015年12个月的图像以及从2007~2015连续9年每年6月和12月的数据,反演双通道渤海湾中心区域(118.525°E, 38.620°N)入瞳亮温,并与同年同月同日的英国气象局海域数据比较。图8中分别对比了原始数据、最终修复数据和英国气象局数据的变化情况,其中图8(b)、(d)中最终修复数据温度为优化后的结果。可以看出,整体修复模型情况稳定,随时间变化波段9平均温度修复误差在0.3℃以内,波段10修复后平均温度与波段9相差0.5℃,双波段温度变化趋势一致。

4 结论

针对HY-1B COCTS冷空异常下热红外两波段辐射基准失效、成像受影响的问题,本文研究发现两极地区受影响较小并以准确度较高的两极数据做样本,建立基于随时间变化的再定标系数响应修复模型和基于概率分布的非均匀校正模型,分别对两波段进行修复。对于渤海湾海域,波段9平均修复温度5.865℃,波段10平均修复温度7.934℃,修复模型在双波段均得到验证,随时间变化情况稳定,波段9平均修复温度误差不超过3%,波段10平均修复温度误差不超过5%。通过建立双通道码值补偿机制,将波段10修复结果进行优化,优化后整体平均温差与波段9相差0.5℃左右。在不考虑昼

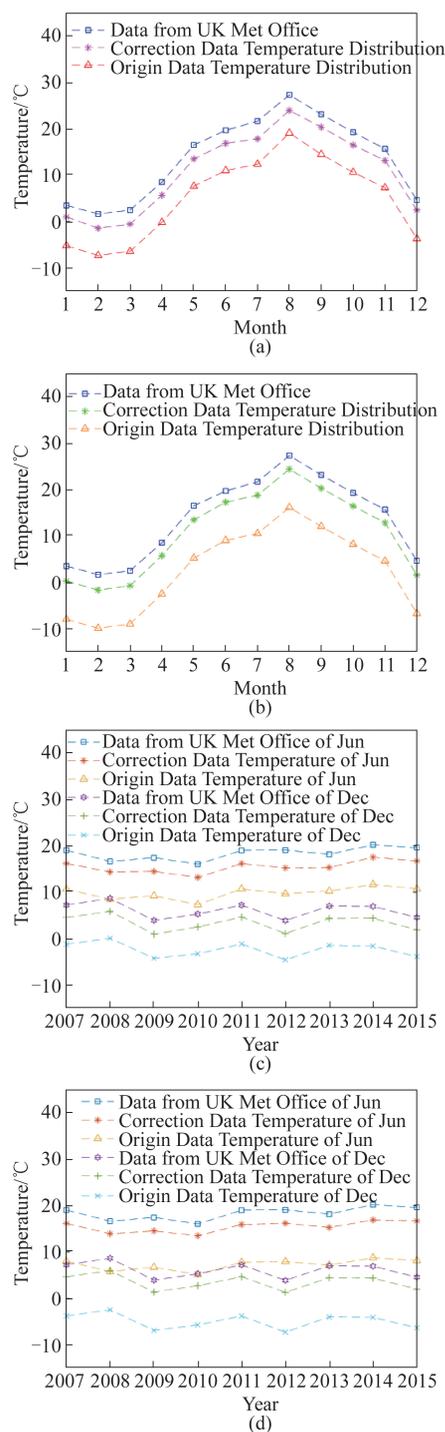


图8 波段9、10渤海湾海域温度随时间变化(a)2015年波段9温度变化,(b)2015年波段10温度变化,(c)9波段6月、12月温度随年份变化,(d)10波段6月、12月温度随年份变化
Fig. 8 Variation of temperatures as time for band 9 and 10 over the Bohai Bay (a) Variation of temperatures in 2015 for band 9, (b) variation of temperatures in 2015 for band 10, (c) variation of temperatures in Jun and Dec as years for band 9, (d) variation of temperatures in Jun and Dec as years for band 10

夜温差和大气衰减的情况下,两波段修复后的目标海温的等效黑体温度与同日实际海域温度相差不超过 3℃,实现了将 HY-1B COCTS 九年数据修复到可以有效使用的目的。本文在解决 HY-1B COCTS 问题的同时,也为针对冷空异常下辐射基准失效的情况提供了一种解决方法,并且证明了修复模型的稳定性,修复的精确性在一定程度上也得到保障。另一方面,探究不同冷空阈值对模型和修复结果的影响以及利用分裂窗算法反演海温也是后续可以继续研究的方向。

References

- [1] GU Song-Yan, WU Rong-Hua, YOU Ran. The analysis and correction of intrusion to space view of FY-3A/MWHS [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**(04):442-450.
- [2] GU Song-Yan, GUO Yang, YOU Ran. Radiance transfer FY-3A/MWHS and space view bias correction [J]. *Remote Sensing Technology and Application* (谷松岩, 郭杨, 游然. FY-3A/MWHS 辐射传递及冷空偏差修正. *遥感技术与应用*), 2015, **30**(02):251-257.
- [3] XU Han-Lie, HU Xiu-Qing, XU Na, *et al.* Discrimination and correction for solar contamination on mid-infrared band of FY-3C/VIRR [J]. *Optics and Precision Engineering* (徐寒列, 胡秀清, 徐娜, 等. FY-3C/可见光红外扫描辐射计中红外通道太阳污染的认识和修正. *光学精密工程*), 2015, **23**(07):1874-1879.
- [4] Kunkee D B, Swadley S D, Poe G A, *et al.* Special sensor microwave imager sounder (SSMIS) radiometric calibration anomalies—Part I: Identification and characterization [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2008, **46**(4):1017-1033.
- [5] CHEN R Y, JONES W L. Creating a consistent multi-decadal oceanic TRMM-GPM brightness temperature record with estimated calibration uncertainty [J]. *Climate*, 2020, **8**(2):31.
- [6] HUANG Yu, ZHANG Bao-Hui, WU Jie, *et al.* Adaptive multipoint calibration non-uniformity correction algorithm [J]. *Infrared Technology* (黄宇, 张宝辉, 吴杰, 等. 自适应多点定标非均匀性校正算法. *红外技术*), 2020, **42**(07):637-643.
- [7] LIU Ya-Mei. High-precision combined nonuniformity correction method based on local constant statistics [J]. *Acta Photonica Sinica* (刘亚梅. 基于局部恒定统计的高精度联合非均匀性校正方法. *光子学报*), 2019, **48**(06):186-195.
- [8] ZHOU Yong-Kang, ZHU You-Pan, ZHAO De-Li, *et al.* A review of scene-based nonuniformity correction algorithms for infrared focal plane arrays [J]. *Infrared Technology* (周永康, 朱尤攀, 赵德利, 等. 基于场景的红外焦平面非均匀校正算法综述. *红外技术*), 2018, **40**(10):952-960.
- [9] Dai X J, Lei Y, Liu Y Z, *et al.* Intensity non-uniformity correction in MR imaging using residual cycle generative adversarial network [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2020, **65**(21):215025-215025.
- [10] LIU Jun-Quan. Research on radiation reference drift law of COCTS [D]. Shanghai: (University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences) 刘军泉. 海洋水色水温扫描仪辐射基准漂移规律研究 [D]. 上海: 中国科学院大学 (中国科学院上海技术物理研究所), 2019.