

扫描镜热辐射校正对 FY-4A 星 AGRI 定标精度的提升研究

李秀举^{1,2}, 王保勇^{1,2}, 吴亚鹏^{1,2}, 韩昌佩^{1,2*}, 曹琦^{1,2}, 周树添^{1,2}, 王伟成^{1,2},
李盼盼^{1,2}

(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)

摘要: 多通道扫描成像辐射计(Advanced Geostationary Radiation Imager, AGRI)是风云四号 A 星的主要有效载荷之一。为了满足 AGRI 长波红外遥感数据高精度量化应用的要求, 构建了扫描镜热辐射随机械转角变化的函数模型, 提出了一种可用于星上黑体和地球场景观测遥感数据的校正算法。基于 FY-4A 星 AGRI 的在轨数据, 分析了模型参数对扫描镜温度的依赖性, 研究评估了校正算法对长波红外定标精度的改善效果。在扫描镜温度场平稳时间段内, 扫描镜热辐射校正后, B11(8.0~9.0 μm)、B12(10.3~11.3 μm)、B13(11.5~12.5 μm) 波段的定标偏差分别可以得到 -2.81 K~+1.06 K、-0.60 K~+0.19 K、-0.68 K~+0.24 K 的显著改善。与 IASI 交叉定标检验结果表明, 改善后的在轨定标亮度温度偏差优于 0.5 K@290 K。

关键词: 热辐射校正; 定标; 仪器背景辐射; 扫描镜; AGRI; 风云四号
中图分类号: TP732.2 **文献标识码:** A

Study on the improvement of scan mirror thermal radiation correction on the calibration accuracy of FY-4A AGRI

LI Xiu-Ju^{1,2}, WANG Bao-Yong^{1,2}, WU Ya-Peng^{1,2}, HAN Chang-Pei^{1,2*}, CAO Qi^{1,2}, ZHOU Shu-Tian^{1,2},
WANG Wei-Cheng^{1,2}, LI Pan-Pan^{1,2}

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

Abstract: The Advanced Geostationary Radiation Imager (AGRI) is one of the main payloads of Fengyun-4A (FY-4A). In order to satisfy requirements of high-accuracy quantitative application of AGRI long-wave infrared (LWIR) remote sensing data, a function model of scan mirror thermal radiation changing with mechanical rotation angle is constructed, and a correction algorithm for remote sensing data of on-board blackbody and earth scene observation is presented. Based on the on-orbit data of FY-4A AGRI, the dependence of the model parameters on the scan mirror temperature is analyzed, and the improvement effect of the correction algorithm on the calibration accuracy of LWIR is studied and evaluated. After thermal radiation correction of scan mirror in the stationary period of mirror temperature field, the calibration deviation of B11(8.0~9.0 μm), B12(10.3~11.3 μm), B13(11.5~12.5 μm) can be improved significantly by -2.81 K~+1.06 K, -0.60 K~+0.19 K, -0.68 K~+0.24 K respectively. The result of inter-calibration validation with IASI shows that the improved on-orbit calibration brightness temperature bias is better than 0.5 K@290 K.

Key words: thermal radiation correction, calibration, instrument background radiation, scan mirror, AGRI, FY-4

收稿日期: 2021-08-11, 修回日期: 2021-09-15

Received date: 2021-08-11, Revised date: 2021-09-15

基金项目: 中国科学院上海技术物理研究所创新专项基金(CX-208)

Foundation items: Supported by the Innovative Special Foundation of Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences(CX-208)

作者简介(Biography): 李秀举(1987—), 男, 安徽淮北人, 工程师, 硕士, 主要从事航天光学遥感仪器高精度量化技术方面的研究工作. E-mail: lixiuju@mail.sitp.ac.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: changpei_han@mail.sitp.ac.cn

引言

风云四号(FY-4)是我国第二代地球静止轨道气象卫星,采用三轴稳定平台,FY-4A星作为该系列的首发星于2016年12月11日成功发射^[1]。AGRI是FY-4A星的主要有效载荷之一,在地球静止轨道对陆地、海洋、云和大气等领域地球环境参数进行高精度、多光谱定量遥感,直接为天气分析和预报、气候预测以及环境和灾害监测服务。观测波段覆盖可见光、近红外、短波红外、中波红外和长波红外,以适应各个应用领域的不同要求^[2]。

作为一颗高精度定量化遥感卫星,如何提高定标精度、尽可能减小测量误差是一个技术难题。FY-4A星对AGRI的设计提出了热辐射波段定标精度优于1K的指标要求^[3],为实现该目标需要从发射前及在轨运行等各个环节进行定标误差源的控制。通过发射前真空低温环境定标和在轨测试发现,AGRI部分长波红外波段(B11、B12、B13)扫描冷空间时原始信号计数值随扫描镜机械转角的变化而变化,该现象将导致观测冷空间与观测目标(如地球场景或黑体)时扫描镜热辐射贡献的仪器背景辐射不一致,从而引入定标误差,影响遥感数据的定量化应用。

国外卫星关于该现象及形成机理的分析报道较多,如GOES-8的成像仪^[4]、Terra和Aqua的中分辨率成像光谱仪(MODIS)^[5-7]、SUOMI-NPP的可见光红外成像辐射计(VIIRS)^[8-9]、GOES-R的先进基线成像仪(ABI)^[10]等都存在类似的现象,产生这种现象的原因是扫描镜表面镀膜的吸收特征,它导致扫描镜的发射率随光学入射角而变化^[11-13]。

目前,国内卫星关于这一现象的报道很少。文章以FY-4A星AGRI在轨测试数据为实验数据源,对该现象进行了研究分析,建立了扫描镜热辐射随

机械转角变化的多项式模型,并提出了一种将该模型参数用于星上黑体和地球场景观测遥感数据校正的算法,评估了该模型参数和校正算法对定标精度的改善效果。

1 AGRI仪器简介

1.1 组成及工作原理

FY-4A星AGRI共有十四个波段,包括六个太阳反射波段,八个热辐射波段,表1给出了热辐射波段的主要性能指标设计要求^[1,14]。AGRI采用双扫描镜(南北扫描镜与东西扫描镜)结合离轴三反主光学系统、线列探测器和辐射制冷器的扫描成像技术。图1给出了AGRI对星上黑体、地球场景、宇宙空间等目标进行观测的光路示意图,热辐射波段采用面源星上黑体定标方案,可以实现全孔径、全光路、全视场的星上辐射定标。来自目标的辐射经南北扫描镜和东西扫描镜反射到离轴三反主光学系统,通过中继光学系统将入射辐射分成可见光、近红外、短波红外、中波红外和长波红外波段。探测器把景物辐射转换成电信号,经过前放、主放和滤波电路,在扫描同步信号的控制下,进行A/D转换并缓存,将数字量编码送到卫星平台,经数传分系统下传^[2-3]。

1.2 热辐射波段定标原理

热辐射波段的定标方程可采用如下的一般形式表述^[10]:

$$L_{target}^{eff} - L_{sp}^{eff} = q \cdot \Delta DN_{target}^2 + m \cdot \Delta DN_{target}, \quad (1)$$

式中, L_{target}^{eff} 为观测目标时到达入瞳的有效辐亮度, L_{sp}^{eff} 为观测4K宇宙空间时到达入瞳的有效辐亮度, ΔDN_{target} 为观测该目标时仪器的净响应信号计数值, q 和 m 分别为非线性定标系数与线性定标系数,由发射前真空低温环境定标测量确定,且线性定标系数 m 通过星上黑体在轨更新。

表1 FY-4A星AGRI热辐射波段设计参数

Table 1 Thermal emissive bands design specifications of FY-4A AGRI

波段	带宽/ μm	瞬时视场/ μrad	NETD@300 K	NETD@240 K	动态范围	主要用途
B07	3.5~4.0, H	56	≤ 0.70 K		260~450 K	高反照率高温目标
B08	3.5~4.0, L	112	≤ 0.20 K	≤ 2.00 K	200~340 K	低反照率目标,地表
B09	5.8~6.7	112	≤ 0.20 K	≤ 0.90 K	200~310 K	高层水汽
B10	6.9~7.3	112	≤ 0.25 K	≤ 0.90 K	200~310 K	中层水汽
B11	8.0~9.0	112	≤ 0.20 K	≤ 0.40 K	180~330 K	总水汽、云
B12	10.3~11.3	112	≤ 0.20 K	≤ 0.40 K	180~330 K	地表温度
B13	11.5~12.5	112	≤ 0.20 K	≤ 0.40 K	180~330 K	总水汽量、地表温度
B14	13.2~13.8	112	≤ 0.50 K	≤ 0.90 K	180~315 K	云、水汽

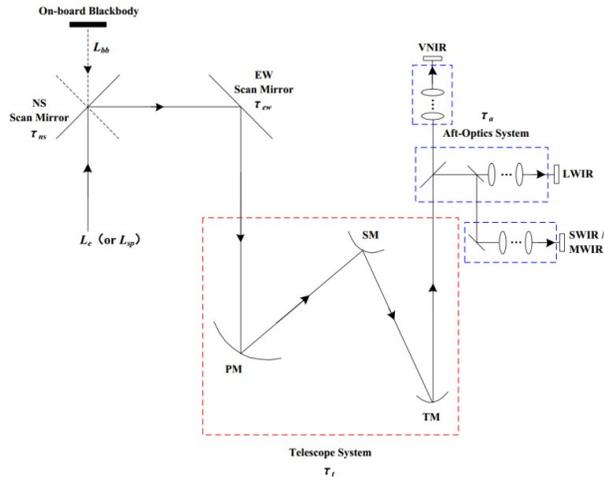


图1 FY-4A星AGRI主要光学布局示意图

Fig. 1 Main optical layout diagram of FY-4A AGRI

对于FY-4A星AGRI热辐射波段观测目标的净响应信号计数值,如式(2)所示:

$$\Delta DN_{target} = DN_{sp} - DN_{target}, \quad (2)$$

式中, DN_{target} 、 DN_{sp} 分别为观测目标和冷空间的原始信号计数值。

当观测目标为4K宇宙空间时,入瞳处总有效辐亮度为

$$m = \frac{L_{bb} \tau_{ns}^{bb} \tau_{ew}^{bb} - q \cdot \Delta DN_{bb}^2 + [L_{ns}(1 - \tau_{ns}^{bb}) \tau_{ew}^{bb} - L_{ns}(1 - \tau_{ns}^{sp}) \tau_{ew}^{sp}] + [L_{ew}(1 - \tau_{ew}^{bb}) - L_{ew}(1 - \tau_{ew}^{sp})]}{\Delta DN_{bb}}, \quad (7)$$

$$\Delta DN_{bb} = DN_{sp} - DN_{bb}, \quad (8)$$

式(8)中, DN_{bb} 、 DN_{sp} 分别为观测黑体和冷空间的原始信号计数值。

对于地球场景观测操作,AGRI快速连续地采集冷空间与地球场景遥感数据,每个扫描行数据采

$$L_e = \frac{q \cdot \Delta DN_e^2 + m \cdot \Delta DN_e - [L_{ns}(1 - \tau_{ns}^e) \tau_{ew}^e - L_{ns}(1 - \tau_{ns}^{sp}) \tau_{ew}^{sp}] - [L_{ew}(1 - \tau_{ew}^e) - L_{ew}(1 - \tau_{ew}^{sp})]}{\tau_{ns}^e \tau_{ew}^e}, \quad (9)$$

$$\Delta DN_e = DN_{sp} - DN_e, \quad (10)$$

式(10)中, DN_e 、 DN_{sp} 分别为观测地球场景和冷空间的原始信号计数值。

2 扫描镜热辐射随机械转角变化的模型及校正算法

2.1 扫描镜热辐射在轨观测模式

式(7)分子中的后两项是观测天上黑体与观测冷空间时扫描镜光学效率(反射率)差异引入的辐亮度贡献,式(9)分子中的后两项是观测地球场景与观测冷空间时扫描镜光学效率(反射率)差异引入的辐亮度贡献。

考虑到扫描镜材料特性与镜体设计特点,精确

$$L_{sp}^{eff} = L_{sp} \tau_{ns}^{sp} \tau_{ew}^{sp} + L_{ns}(1 - \tau_{ns}^{sp}) \tau_{ew}^{sp} + L_{ew}(1 - \tau_{ew}^{sp}). \quad (3)$$

在实际应用中,宇宙空间都被当作零辐射基准来处理,因此,式(3)可以简化为

$$L_{sp}^{eff} = L_{ns}(1 - \tau_{ns}^{sp}) \tau_{ew}^{sp} + L_{ew}(1 - \tau_{ew}^{sp}). \quad (4)$$

类似地,当观测目标为黑体时,入瞳处的总有效辐亮度为

$$L_{bb}^{eff} = L_{bb} \tau_{ns}^{bb} \tau_{ew}^{bb} + L_{ns}(1 - \tau_{ns}^{bb}) \tau_{ew}^{bb} + L_{ew}(1 - \tau_{ew}^{bb}). \quad (5)$$

当观测目标为地球场景时,入瞳处的总有效辐亮度为

$$L_e^{eff} = L_e \tau_{ns}^e \tau_{ew}^e + L_{ns}(1 - \tau_{ns}^e) \tau_{ew}^e + L_{ew}(1 - \tau_{ew}^e), \quad (6)$$

式(3)~式(6)中, L 为观测目标或光学元件的热辐射辐亮度, τ 为光学元件的光学效率,下标“ns”和“ew”分别表示该光学元件为南北扫描镜和东西扫描镜;脚标“sp”、“bb”和“e”分别表示扫描镜观测目标为冷空间、黑体和地球场景。

对于天上黑体观测操作,AGRI快速连续地执行“冷空间观测→天上黑体观测→冷空间观测”过程,整个过程持续时间大约20秒,在该时间内光学元件温度场基本保持不变,因此辐亮度 L_{ns} 、 L_{ew} 在式(4)与式(5)中是一致的。根据式(4)、(5)及式(1),可以计算出线性定标系数如下:

集时间在秒级水平,在该时间内光学元件温度场也基本保持不变,因此辐亮度 L_{ns} 、 L_{ew} 在式(4)与式(6)中是一致的。根据式(4)、(6)、(1)以及从式(7)获得的线性定标系数 m ,可以确定观测地球场景的辐亮度如下:

测量扫描镜的镜面温度存在较大困难;另外,在轨七年任务周期内,受空间环境等因素影响,光学元件的光学效率可能会发生变化,特别是扫描镜位于整个光路的最前端而更易受到空间环境影响,光学效率衰变可能比其他光学元件更明显。因此,在式(7)与式(9)中,通过计算FY-4A星AGRI扫描镜自身热辐射亮度来精确获取 m 和 L_e 的方法不具有可行性。

在辐射响应模型中,辐亮度的差异都会相应地体现在仪器原始信号计数值的差异上。在式(7)中,观测天上黑体与观测冷空间时扫描镜光学效率的差异,间接反映的是观测天上黑体与观测冷空间这两种机械转角下扫描镜热辐射到达探测器的辐

亮度差异,这种差异被包含在黑体原始信号计数值 DN_{bb} 与冷空间原始信号计数值 DN_{sp} 的差异中。因此,在式(7)中,令观测星上黑体与观测冷空间时扫描镜光学效率差异引入的辐亮度差异项为零,同时需要将 DN_{bb} 与 DN_{sp} 中该辐亮度差异造成的信号差异消除,相应的式(7)与式(8)可以改写成如下形式:

$$m = \frac{L_{bb} \tau_{ns}^{bb} \tau_{ew}^{bb} - q \cdot \Delta DN_{bb}^2}{\Delta DN_{bb}} \quad (11)$$

$$\Delta DN_{bb} = DN_{sp} - DN_{bb}^{correct} \quad (12)$$

类似地,在式(9)中,观测地球场景与观测冷空间时扫描镜光学效率的差异可以作相同的处理,相应的式(9)与式(10)可以改写成如下形式:

$$L_e = \frac{q \cdot \Delta DN_e^2 + m \cdot \Delta DN_e}{\tau_{ns}^e \tau_{ew}^e} \quad (13)$$

$$\Delta DN_e = DN_{sp} - DN_e^{correct} \quad (14)$$

以上关于定标系数 m 和地球场景辐亮度 L_e 的计算公式都是基于仪器辐射响应模型为二次多项式的一般情况。考虑到后面分析的方便以及文章侧重于介绍扫描镜热辐射校正算法,此处暂且忽略辐射响应模型的非线性项,对上式进行简化处理。

定标系数 m 计算式可以简化为

$$m = \frac{L_{bb} \tau_{ns}^{bb} \tau_{ew}^{bb}}{\Delta DN_{bb}} \quad (15)$$

地球场景的辐亮度计算式可以简化为

$$L_e = \frac{m \cdot \Delta DN_e}{\tau_{ns}^e \tau_{ew}^e} \quad (16)$$

扫描镜自身热辐射除了与扫描镜温度相关外,还与扫描镜机械转角相关。对于式(12),需要将星上黑体观测与冷空间观测时两个机械转角上的扫描镜热辐射贡献校正到一致;对于式(14),需要将地球场景观测与冷空间观测时两个机械转角上的扫描镜热辐射贡献校正到一致。为此,设计了相应的在轨观测模式^[15],如图2~3所示。对于东西镜热辐射校正数据获取过程,首先,南北镜机械转角(α_{ns})指向冷空间保持不动,东西镜机械转角(α_{ew})从一侧转向另一侧采集扫描镜热辐射遥感数据,然后东西镜再原路返回采集扫描镜热辐射遥感数据,整个过程持续时间为秒级。对于南北镜热辐射校正数据获取过程,首先,东西镜机械转角指向冷空间保持不动,南北镜机械转角从一侧转向另一侧采集扫描镜热辐射遥感数据,然后南北镜再原路返回采集扫描镜热辐射遥感数据,整个过程持续时间也为秒级。

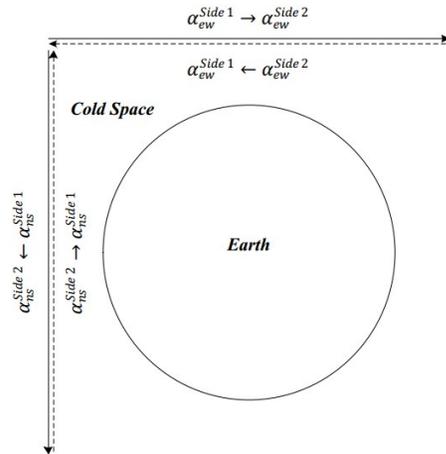


图2 扫描镜热辐射模型遥感数据获取过程示意图

Fig. 2 Diagram of remote sensing data acquisition process of scan mirror thermal radiation model

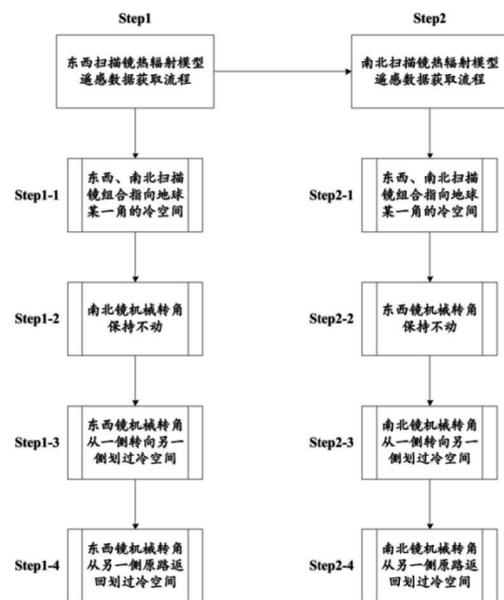


图3 扫描镜热辐射模型遥感数据获取流程图

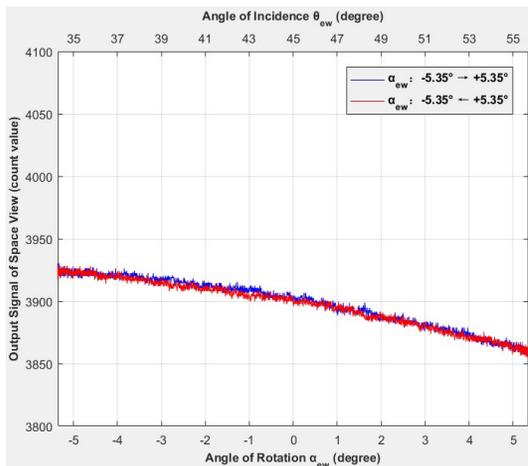
Fig. 3 Flow chart of remote sensing data acquisition of scan mirror thermal radiation model

2.2 模型及校正算法

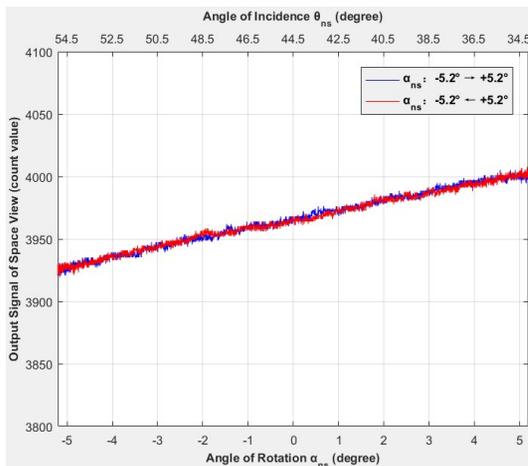
经发射前真空低温条件下定标试验和发射后在轨测试验证,B11~B13波段存在扫描镜热辐射随机械转角变化的现象,因此后面仅对这三个长波红外波段进行讨论。图4~6依次给出了2017年4月24日05:27:51(UTC)这一时次B11(8.0~9.0 μm)、B12(10.3~11.3 μm)、B13(11.5~12.5 μm)三个长波红外波段按照图2~3所示观测流程获取的宇宙空间原始信号计数值。

图4~6显示,B11、B12、B13波段的原始信号计数值随机械转角的变化趋势相同,仅在相对变化量

值上存在差异;B11、B12、B13波段原始信号计数值随机械转角的相对变化量值依次减小,主要是因为这三个波段的扫描镜光学效率(反射率)随机械转角(或光学入射角)的相对变化量值依次减小。从光学入射角来看,原始信号计数值随东西镜光学入射角与南北镜光学入射角的变化趋势一致;从机械转角来看,原始信号计数值随东西镜机械转角与南北镜机械转角的变化趋势相反,这是由于两个扫描镜机械转角极性定义差异造成的。



(a)

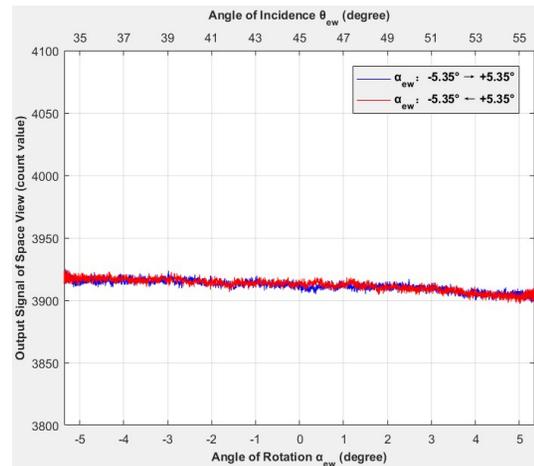


(b)

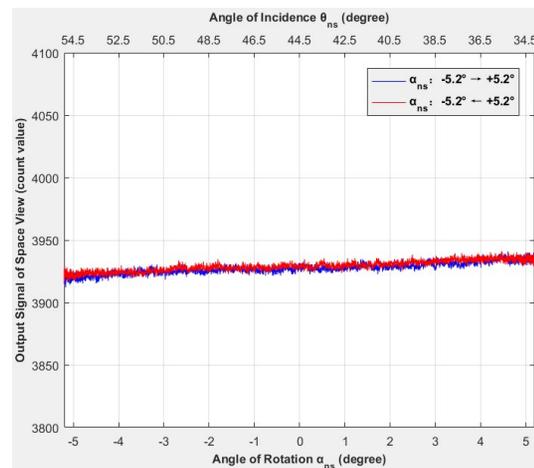
图4 B11(8.0~9.0 μm)扫描冷空间的原始信号计数值:(a)东西镜,(b)南北镜

Fig. 4 Raw signal count value of B11(8.0~9.0 μm) scanning cold space: (a) EW scan mirror, (b) NS scan mirror

对发射前定标试验和在轨测试数据研究发现,AGRI扫描镜热辐射贡献的原始信号计数值随机械转角的变化规律可以近似采用一个二次多项式模



(a)



(b)

图5 B12(10.3~11.3 μm)扫描冷空间的原始信号计数值:(a)东西镜,(b)南北镜

Fig. 5 Raw signal count value of B12(10.3~11.3 μm) scanning cold space: (a) EW scan mirror, (b) NS scan mirror

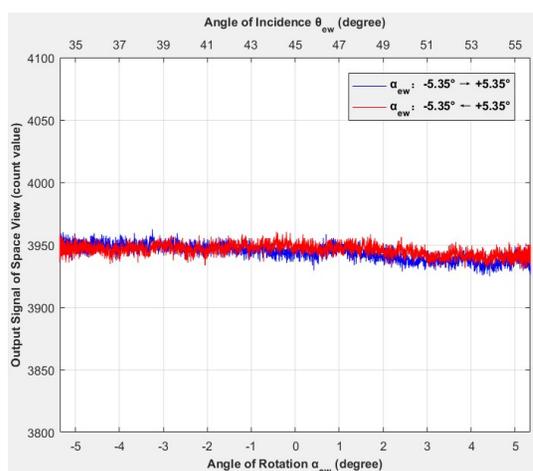
型来描述:

$$f_{ew}(\alpha_{ew}) = C_{ew2} \cdot \alpha_{ew}^2 + C_{ew1} \cdot \alpha_{ew} + C_{ew0}, \quad (17)$$

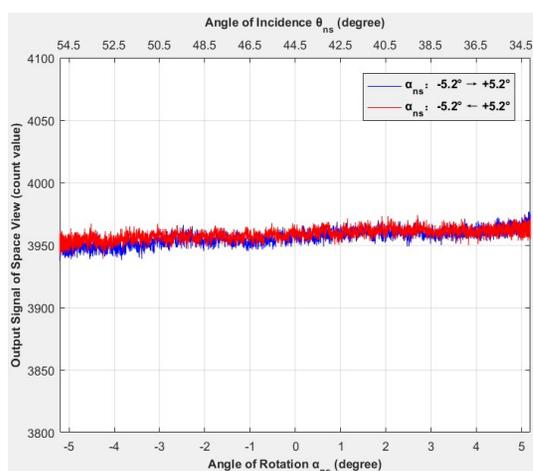
$$f_{ns}(\alpha_{ns}) = C_{ns2} \cdot \alpha_{ns}^2 + C_{ns1} \cdot \alpha_{ns} + C_{ns0}, \quad (18)$$

式(17)和式(18)中, α_{ew} 、 α_{ns} 分别是东西镜和南北镜的机械转角,单位是度; C_{ew2} 、 C_{ew1} 、 C_{ew0} 和 C_{ns2} 、 C_{ns1} 、 C_{ns0} 分别是东西镜和南北镜二次多项式模型的系数,可以通过对图4~6中的数据进行数值拟合得到。

FY-4A星AGRI大约每15分钟进行一次图2~3所示的冷空间扫描,获取扫描镜热辐射随机械转角变化的遥感数据,因此,式(17)和式(18)中的模型系数也15分钟更新一次。该组模型系数将同步用于对应时次星上黑体观测任务和地球常规成像任



(a)



(b)

图6 B13(11.5~12.5 μm)扫描冷空间的原始信号计数值:(a)东西镜,(b)南北镜

Fig. 6 Raw signal count value of B13(11.5~12.5 μm) scanning cold space: (a) EW scan mirror, (b) NS scan mirror

务遥感数据的校正,校正算法如下所示:

$$DN_{bb}^{correct} = DN_{bb} + [f_{ew}(\alpha_{ew}^{sp}) - f_{ew}(\alpha_{ew}^{bb})] + [f_{ns}(\alpha_{ns}^{sp}) - f_{ns}(90^\circ - \alpha_{ns}^{bb})], \quad (19)$$

$$DN_e^{correct} = DN_e + [f_{ew}(\alpha_{ew}^{sp}) - f_{ew}(\alpha_{ew}^e)] + [f_{ns}(\alpha_{ns}^{sp}) - f_{ns}(\alpha_{ns}^e)], \quad (20)$$

式(19)中, DN_{bb} 、 $DN_{bb}^{correct}$ 分别是扫描镜热辐射校正前、后观测黑体的原始信号计数值;式(20)中, DN_e 、 $DN_e^{correct}$ 分别是扫描镜热辐射校正前、后观测地球场景的原始信号计数值,具体实施流程如图7所示。从式(19)和式(20)中可以知道,二次多项式模型的常数项对遥感数据校正没有贡献,所以,后续不对

常数项进行展开介绍。

3 实验验证

3.1 数据源

以2017年3月至2018年2月,每月15日的00:00~24:00(UTC)期间在轨遥感数据为实验数据源给出上述二次多项式模型系数结果以及校正算法对定标精度的影响评估。风云四号A星AGRI大约每15分钟依次执行一组宇宙空间扫描任务、星上黑体观测任务、地球全圆盘常规成像任务^[15]等,所选日期内的具体观测时次分布如表2所示,累计1042次观测。

3.2 验证结果

AGRI扫描镜镜体的温度近似采用扫描镜框架温度来表征,南北扫描镜框架控温在+5℃附近,东西扫描镜框架控温在+10℃附近,受到地球静止轨道空间环境温度影响,扫描镜框架温度会出现周期性的波动^[16]。图8给出了2018年2月15日一天24小时内的扫描镜温度分布情况,扫描镜温度场在一年中每天基本都呈现类似的分布。

图9~10分别给出了扫描镜热辐射原始信号数值随机机械转角变化的二次多项式模型的二次项和一次项系数。

从图9~10中结果可以看出,无论是多项式模型的二次项系数还是一次项系数,都与图8中类似的单日扫描镜温度场周期性波动密切相关,而且随着星下点午夜附近扫描镜温度的快速上升,模型系数的幅值(绝对值)也在迅速增大。在同一扫描镜机械转角下,一次项系数对遥感数据的校正贡献大于二次项系数的贡献。B11、B12、B13波段模型系数的幅值(绝对值)依次减小,如前所述主要原因还是扫描镜在这三个波段的发射率随光学入射角变化趋势不同。

FY-4A星AGRI以南北镜步进、东西镜往返扫描的方式对地观测成像。对于图9~10所示模型系数数量值,图11给出了当东西镜扫描范围横跨17.6°地球张角时原始信号计数值变化量对应的宇宙空间虚拟温差。图11结果表明,B11波段在17.6°地球张角两端对应的冷空间目标虚拟温差可以达到178~200K,B12、B13波段对应的冷空间目标虚拟温差相对较低一些,分别为133~147K、123~137K。

AGRI观测星上黑体时,扫描镜的机械转角组合为 $\alpha_{ew}^{bb} = 0^\circ$, $\alpha_{ns}^{bb} = 90^\circ$;在采集星上黑体定标数据之前,扫描镜的机械转角组合先要指向宇宙空间

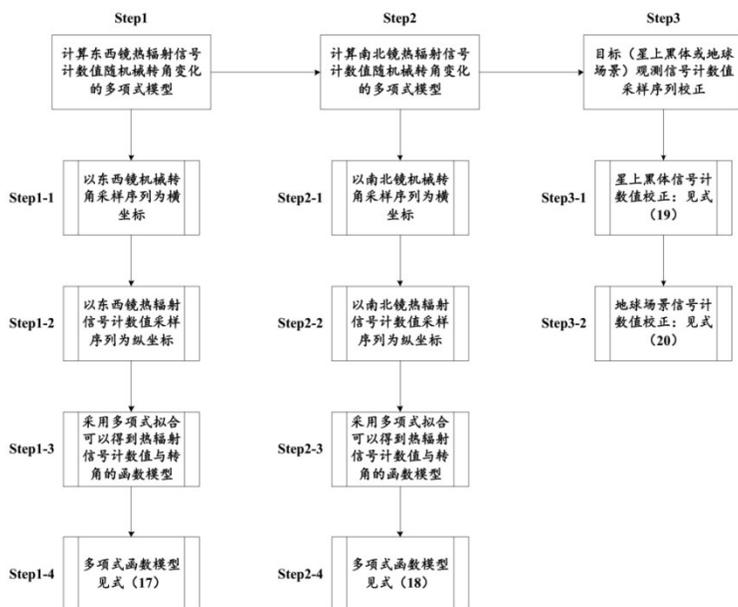


图7 扫描镜热辐射校正算法实现流程图

Fig. 7 Implementation flow chart of scan mirror thermal radiation correction algorithm

表2 FY-4A 星 AGRI 遥感数据观测时次分布情况

Table 2 Observation time distribution of FY-4A AGRI remote sensing data

序号	日期	时次	次数序列
1	2017/03/15	95	1~95
2	2017/04/15	93	96~188
3	2017/05/15	87	189~275
4	2017/06/15	84	276~359
5	2017/07/15	84	360~443
6	2017/08/15	81	444~524
7	2017/09/15	83	525~607
8	2017/10/15	83	608~690
9	2017/11/15	80	691~770
10	2017/12/15	85	771~855
11	2018/01/15	92	856~947
12	2018/02/15	95	948~1042

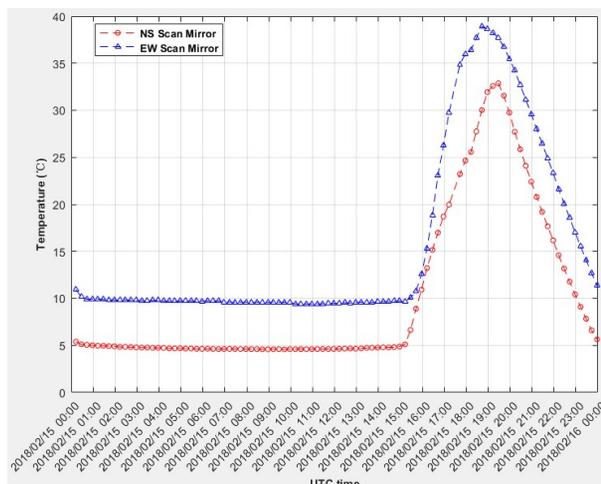


图8 24小时内的扫描镜温度分布示例

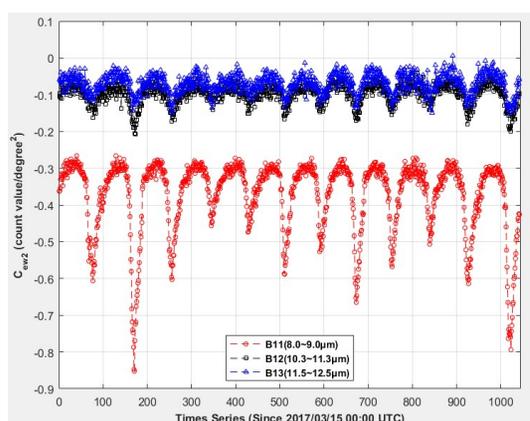
Fig. 8 Example of scan mirror temperature distribution within 24 hours

$(\alpha_{ew}^{sp}, \alpha_{ns}^{sp})$ 采集冷空间定标数据。根据图9~10中的扫描镜热辐射随机机械转角变化的模型系数,结合式(19)可以实现对星上黑体观测原始信号计数值 DN_{bb} 的校正,从而消除扫描镜热辐射在冷空间定标 $(\alpha_{ew}^{sp}, \alpha_{ns}^{sp})$ 与黑体定标 $(\alpha_{ew}^{bb}, \alpha_{ns}^{bb})$ 两个位置上的差异,得到校正后的星上黑体观测原始信号计数值 $DN_{bb}^{correct}$ 。

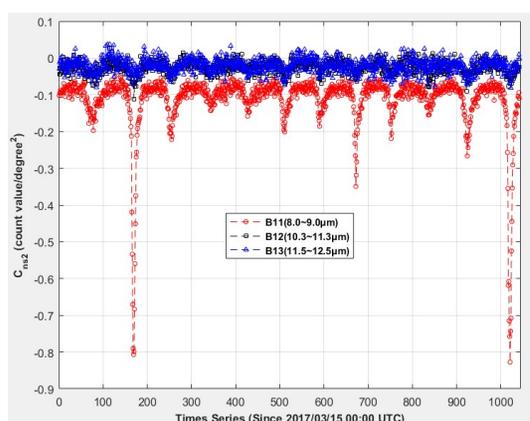
根据式(12)、式(15)、AGRI 仪器光谱响应函数、星上黑体测量温度及普朗克定律,可以计算出星上黑体观测原始信号计数值在校正前 (DN_{bb}) 与校正后 $(DN_{bb}^{correct})$ 定标系数 m 的相对变化情况,如图

12 所示。对于红外波段的定标结果比较,通常以亮温形式表述会更加直观,因此,图13给出了校正前后定标系数在反演 295 K 附近目标时的亮温差异。

与扫描镜热辐射随机机械转角变化的模型系数分布不同,图12~13所示校正前后定标结果差异的形状分布除了与单日扫描镜温度场(图8)周期性波动相关以外,还与黑体定标前的冷空间定标 $(\alpha_{ew}^{sp}, \alpha_{ns}^{sp})$ 位置选择相关。前者决定了模型系数 $C_{ew2}, C_{ew1}, C_{ns2}, C_{ns1}$ 的大小,后者决定了冷空间与黑体在机械转角上的相对位置,结合式(19)可以看出,这两者都



(a)



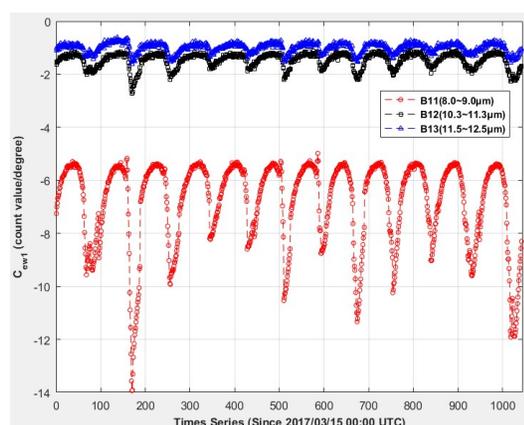
(b)

图9 扫描镜热辐射随机转角变化的模型系数(二次项): (a)东西镜, (b)南北镜

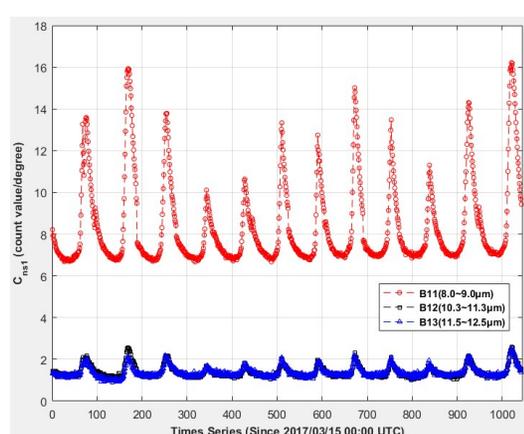
Fig. 9 Model coefficient of scan mirror thermal radiation changing with rotation angle (quadratic term): (a) EW scan mirror, (b) NS scan mirror

直接影响到星上黑体原始信号计数值校正量的大小。

图13表明,扫描镜热辐射校正与否对定标结果影响很大。在表2所列日期时次内,B11(8.0~9.0 μm)波段校正后定标偏差改善-5.82 K~+3.26 K, B12(10.3~11.3 μm)波段校正后定标偏差改善-1.04 K~+0.49 K, B13(11.5~12.5 μm)波段校正后定标偏差改善-1.05 K~+0.54 K。如果只考虑图8中的单日扫描镜温度场平稳段(南北镜+5 $^{\circ}\text{C}$,东西镜+10 $^{\circ}\text{C}$),B11(8.0~9.0 μm)波段校正后定标偏差改善-2.81 K~+1.06 K, B12(10.3~11.3 μm)波段校正后定标偏差改善-0.60 K~+0.19 K, B13(11.5~12.5 μm)波段校正后定标偏差改善-0.68 K~+0.24 K。经过上述扫描镜热辐射校正后,与国际公认标



(a)



(b)

图10 扫描镜热辐射随机转角变化的模型系数(一次项): (a)东西镜, (b)南北镜

Fig. 10 Model coefficient of scan mirror thermal radiation changing with rotation angle (linear term): (a) EW scan mirror, (b) NS scan mirror

准仪器IASI进行长时间序列的交叉定标检验,这三个长波红外波段的在轨定标偏差均优于0.5 K@290 K^[17]。

4 结论

扫描镜热辐射随机转角变化的现象将导致AGRI观测目标与观测冷空间时的仪器背景辐射存在差异,采用目标减冷空间的方式计算净响应信号时会引入一定的误差。文章对FY-4A星AGRI在轨遥感数据的研究分析,建立了扫描镜热辐射原始信号计数值随机转角变化的二次多项式模型;模型系数的幅值(绝对值)与扫描镜温度场具有显著的相关性,且B11、B12、B13这三个长波红外波段的模型系数幅值依次减小;模型系数在东西镜扫描范围

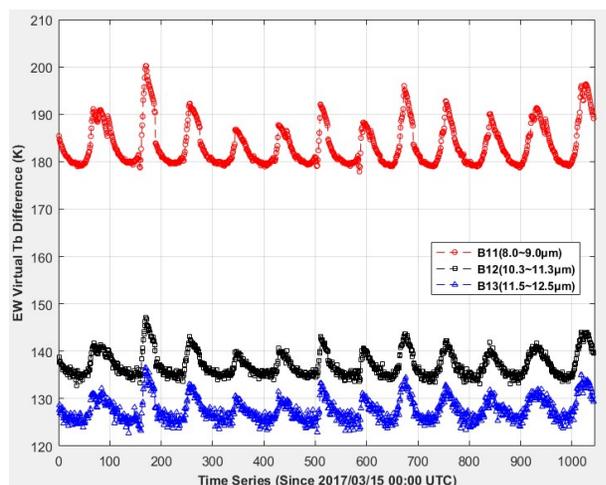


图 11 东西镜扫描横跨 17.6° 地球张角时信号计数数值变化量对应的虚拟温差

Fig. 11 Virtual temperature difference corresponding to the change of signal count value when EW mirror scanning across 17.6° earth field angle

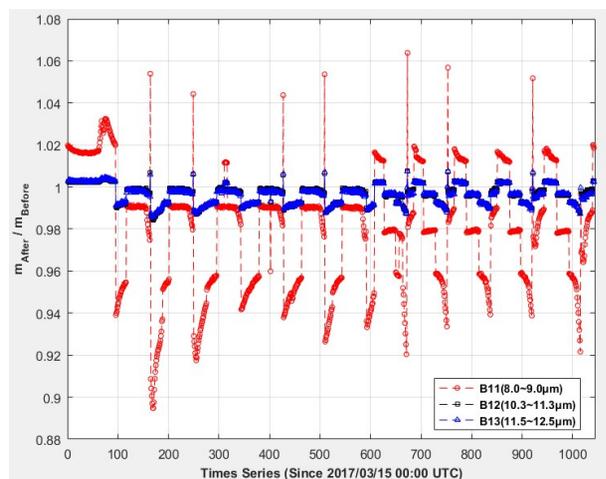


图 12 扫描镜热辐射校正前后星上定标系数之比

Fig. 12 Ratio of calibration coefficients before and after scan mirror thermal radiation correction

横跨 17.6° 地球张角两端对应的冷空间目标虚拟温差最高可以达到 200 K (@B11)、147 K (@B12)、137 K (@B13)。根据扫描镜热辐射随机转角变化的多项式模型,相应地提出了一种星上黑体和地球场景观测遥感数据校正算法,并对校正算法的效果进行了评价;对于非星下点午夜附近的时间段,经扫描镜热辐射校正后,长波红外波段的定标误差可以减小 $-2.81 \text{ K} \sim +1.06 \text{ K}$ (@B11)、 $-0.60 \text{ K} \sim +0.19 \text{ K}$ (@B12)、 $-0.68 \text{ K} \sim +0.24 \text{ K}$ (@B13)。通过与 IASI 进行交叉定标检验,这三个波段的在轨定标偏差可优于 $0.5 \text{ K}@290 \text{ K}$ 。

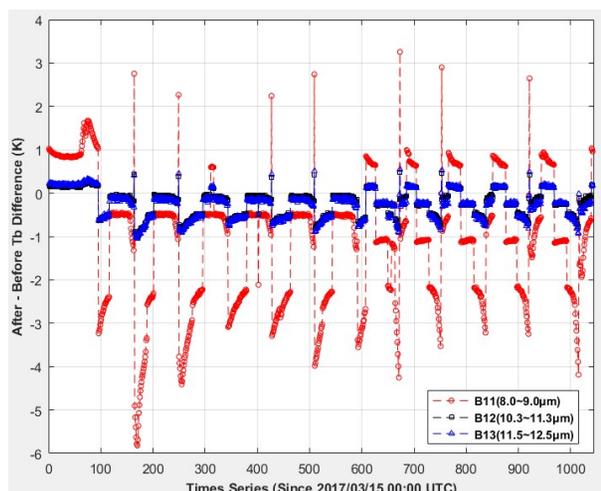


图 13 扫描镜热辐射校正前后定标结果比较 (@ $\sim 295 \text{ K}$)

Fig. 13 Comparison of calibration results before and after scan mirror thermal radiation correction (about 295 K)

致谢:感谢国家卫星气象中心提供的在轨观测数据资料以及在定标与真实性检验等方面的工作。

References

- [1] LU Feng, ZHANG Xiao-Hu, CHEN Bo-Yang, *et al.* FY-4 geostationary meteorological satellite imaging characteristics and its application prospects [J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2017, **37**(02): 1-12. (陆风, 张晓虎, 陈博洋, 等. 风云四号气象卫星成像特性及其应用前景. *海洋气象学报*, 2017, **37**(02): 1-12.)
- [2] DONG Yao-Hai. FY-4 meteorological satellite and its application prospect [J]. *Aerospace Shanghai*, 2016, **33**(02): 1-8. (董瑶海. 风云四号气象卫星及其应用展望. *上海航天*, 2016, **33**(02): 1-8.)
- [3] CHEN Bo-Yang, WU Qiong, FENG Xuan, *et al.* On-orbit test to FY-4A AGRI and generating RBG image [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2018, **37**(04): 411-415. (陈博洋, 吴琼, 冯绚, 等. FY-4A 多通道扫描辐射成像仪评价与图像合成. *红外与毫米波学报*, 2018, **37**(04): 411-415.)
- [4] Weinreb M, Jamieson M, Fulton N, *et al.* Operational calibration of Geostationary Operational Environmental Satellite-8 and-9 imagers and sounders [J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(27): 6895-6904.
- [5] Chiang K, Xiong X. Pre-launch characterization of Aqua MODIS scan mirror response versus scan angle for thermal emissive bands [J]. *Proceedings of SPIE - Earth Observing Systems XII*, 2007, 6677, DOI: 10.1117/12.731562.
- [6] Xiong X, Chiang K, Chen N, *et al.* Results and lessons from MODIS thermal emissive bands calibration: pre-launch to on-orbit [J]. *Proceedings of SPIE - Earth Observing Systems XI*, 2006, 6296, DOI: 10.1117/12.680992.
- [7] Xiong X, Sun J, Wu A, *et al.* Terra and Aqua MODIS calibration algorithms and uncertainty analysis [J]. *Proceedings of SPIE - Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites IX*, 2005, 5978, DOI: 10.1117/12.627631.
- [8] Guenther B, Xiong X, Barnes W L, *et al.* A calibration al-

- gorithm design and analysis for VIIRS thermal emissive bands based on the EOS MODIS approach[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2003, 3036-3038.
- [9] Oudrari H, McIntire J, Xiong X, *et al.* Prelaunch radiometric characterization and calibration of the S-NPP VIIRS sensor [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, **53**(04): 2195-2210.
- [10] Datla R, Shao X, Cao C, *et al.* Comparison of the calibration algorithms and SI traceability of MODIS, VIIRS, GOES, and GOES-R ABI sensors [J]. *Remote Sensing*, 2016, **8**(2): 1-26.
- [11] Michael E M. Alternatives to SiO_x for protective scan mirror coatings in remote sensing instruments[J]. *Proceedings of SPIE - Earth Observing Systems IV*, 1999, 3750, DOI: 10.1117/12.363524.
- [12] Hass G, Heaney J B, Herzig H, *et al.* Reflectance and durability of Ag mirrors coated with thin layers of Al₂O₃ plus reactively deposited silicon oxide [J]. *Applied Optics*, 1975, **14**(11): 2639-2644.
- [13] Hass G. Reflectance and preparation of front-surface mirrors for use at various angles of incidence from the ultraviolet to the far infrared[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, **72**(01): 27-39.
- [14] LI Kai, HAN Chang-Pei, ZHU Yu, *et al.* Registration method of dislocation rows for the advanced geosynchronous radiation imager [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2020, **39**(03): 348-355.(李凯, 韩昌佩, 朱钰, 等. 多通道扫描辐射计行间错位的配准方法. *红外与毫米波学报*), 2020, **39**(03): 348-355.
- [15] Shang J, Yang L, Huang P, *et al.* Instrument observation strategy for a new generation of three-axis-stabilized geostationary meteorological satellites from China [J]. *Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems*, 2019, **8**(2): 161-175.
- [16] WANG Gan-Quan, SHEN Xia, WANG Wei-Cheng, *et al.* On board adaptation of temperature of the FY-4 meteorological satellite radiation imager [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2018, **37**(05): 540-544.(王淦泉, 沈霞, 王伟成, 等. 风云四号气象卫星辐射成像仪在轨温度环境适应性. *红外与毫米波学报*), 2018, **37**(05): 540-544.
- [17] The nineteenth session of the GSICS Executive Panel. GSICS-EP-19_Final-Report [R/OL]. Bengaluru, India, 2018 [2021-09-15]. <https://gsics.wmo.int/en/product-services-and-technical-information>.