

# 多角度偏振成像仪温度校正方法

涂碧海<sup>1,2,3\*</sup>, 洪津<sup>1,3</sup>, 姚萍萍<sup>1,3</sup>, 王羿<sup>1,3</sup>, 袁银麟<sup>1,3</sup>, 翁建文<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

<sup>3</sup>中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

**摘要** 多角度偏振成像仪温度变化是影响辐射定标精度的因素之一, 科学遥感数据处理首先进行温度校正。通过成像仪工作原理和偏振测量模型分析了温度变化的影响, 结合热控设计和热真空实验情况, 针对辐射测量的影响制定了温度补偿校正方法。设计覆盖在轨不同阶段的温度响应测试方案, 监测影响实验数据的测试光源等外界条件, 有效消除探测器帧转移效应影响, 获取辐射定标系数与温度变化响应之间的关系。依据实验和在轨数据分析, 通过暗背景通道实时测量及辐射响应系数补偿的温度校正方法, 使温度变化带来的辐射测量误差减小至 0.1%, 满足在轨辐射校正需求。

**关键词** 遥感; 多角度偏振成像仪; 辐射校正; 温度校正; 控温范围

中图分类号 TH744

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1010002

## Temperature-Correction Method for Directional Polarimetric Camera

Tu Bihai<sup>1,2,3\*</sup>, Hong Jin<sup>1,3</sup>, Yao Pingping<sup>1,3</sup>, Wang Yi<sup>1,3</sup>,  
Yuan Yinlin<sup>1,3</sup>, Weng Jianwen<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** Temperature change affects the accuracy of the radiometric calibration of the directional polarimetric camera (DPC). The first step in scientific remote-sensing data processing is temperature correction. Herein, we analyze the influence of temperature change based on the DPC working principle and the polarization-measurement model. Combined with the thermal-control design and thermal vacuum test, we develop a temperature-compensation-correction method aiming at the influence of radiation measurement. We design a temperature-response test scheme for in-orbit temperature conditions at different stages to monitor external conditions which affect test data and effectively eliminate the influence of the detector-frame transfer effect, and obtain the relationship between the radiation calibration coefficient and the temperature-change response. According to the analysis of experimental data and in-orbit data, the radiation measurement error caused by temperature change reduces to less than +0.1% through real-time measurement of the dark-background channel and through the temperature-correction method of radiation-response-coefficient compensation, which meets the requirements of in-orbit radiation correction.

**Key words** remote sensing; directional polarimetric camera; radiation calibration; temperature correction; temperature control

**OCIS codes** 280.6780; 120.5410; 120.4640; 040.1520

收稿日期: 2019-02-01; 修回日期: 2019-05-18; 录用日期: 2019-06-10

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项(民用部分)(30-Y20A19-9007-15/17)、高分专项(民用部分)卫星应用共性关键技术项目(50-Y20A38-0509-15/16)

\* E-mail: tubihai@aiofm.ac.cn

# 1 引 言

高分五号卫星大气气溶胶多角度偏振成像仪(DPC)用于获取全球大气气溶胶和云性质参数。偏振成像仪通过广角镜头获取多角度、多波段偏振辐射成像信息。多角度、多光谱偏振信息可用于提高气溶胶参数确定能力<sup>[1]</sup>。偏振成像仪对定标有特定需求<sup>[2]</sup>,需开展偏振测量地面验证和分析工作<sup>[3-5]</sup>。

在卫星在轨运行期间,随时间和空间环境的变化,仪器辐射响应会发生变化,因此需要通过辐射定标进行校正<sup>[6]</sup>,辐射定标包括场地定标和星上传感器交叉定标<sup>[7]</sup>,还需以地面大气参数监测场网数据作为支撑<sup>[8-10]</sup>。影响辐射响应度的因素较多,如光学器件特性变化、机械结构形变和探测器衰减等,这里主要讨论温度影响以及温度校正方法。

为保护仪器并减小温度对数据的影响<sup>[11]</sup>,同时保障仪器在大气常温条件和在轨热真空环境下均能稳定可靠工作,采用热控方式补偿温度影响<sup>[12]</sup>。不同轨道温度环境不同,地球静止轨道上温度变化剧烈,中低轨太阳同步轨道在光照成像区的温度变化较为平缓<sup>[13-14]</sup>。仪器在设定温度点实现动态平衡,可减小温度变化带来的测量误差<sup>[15-16]</sup>。在轨辐射校正需明确外部环境温度适应范围和内部环境所需控温范围,制订有效的温度校正方法<sup>[17]</sup>。

本文介绍了偏振成像仪的工作原理,分析了热控范围内温度对光学系统和电子学系统的影响,研究了在轨运行温度敏感性。针对热真空温度响应实验中测温点热敏电阻选择和在校校正,制定完整的温度校正方法,并给出在轨工作温度变化情况,温度校正方法满足地面数据处理需求。

## 2 偏振成像仪温度影响分析

偏振成像仪由三个单元组成,光学探测单元(GP301)为前端光学探测部分,信息处理单元(GP302)实现载荷与卫星的数据互联,驱动控制单元(GP303)完成电机驱动控制和光学探测单元热控,三个单元的功能如图1所示,信息处理单元和驱动控制单元放置于卫星舱内,光学探测单元位于舱外且安装面与卫星平台热隔离,光学探测单元热控由驱动控制单元实现温度采集与控温。

多角度成像方式如图2所示,通过大视场获取同一区域的多角度数据,运行时偏振成像仪进入观测模式,利用温控单元进行热控补偿,光辐射会聚于光电耦合探测器(CCD),探测器图像信号被转换为数字量

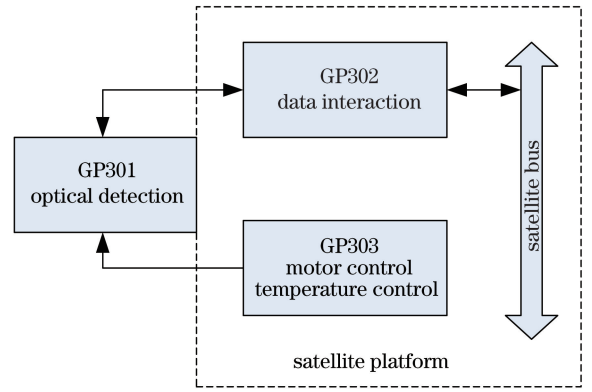


图1 仪器系统组成示意图

Fig. 1 Diagram of instrument system composition (DN),由星地通道进入地面应用系统计算输出多角度观测的辐亮度数据,仪器的基本说明见表1。

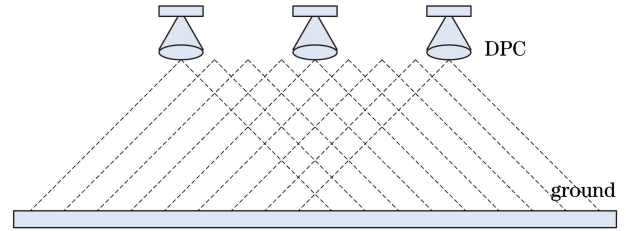


图2 多角度成像示意图

Fig. 2 Schematic of multi-angle imaging

表1 仪器说明

Table 1 Specifications of instrument

Content	Parameter
Orbit type	Sun synchronous orbit
Orbit altitude /km	708
Field of view /( $^{\circ}$ )	118.74
Spatial resolution /km	3.29 (sub-satellite point)
Number of multi-angle	9 (along orbit)
Spectral band /nm	443,565,763,765,910
Angle of polarizer /( $^{\circ}$ )	490(P),670(P),865(P)
Band selection mode	0,60,120
Imaging method	Filter wheel
Detector array size	Staring
Pixel size /( $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$ )	512 $\times$ 512
Focal length of system /mm	22.5 $\times$ 22.5
Relative aperture	4.833
	1:4

偏振成像仪位于708 km太阳同步轨道,包含5个非偏振波段和3个偏振波段,每个偏振光谱包含安装不同方向偏振片( $0^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $120^{\circ}$ )的3个探测通道,用于偏振解析,其对地观测幅宽为1850 km,一天基本可以覆盖全球进行偏振探测。

工作空间跨度带来的温度变化对光学系统产生的影响主要体现在几何视场变化。偏振成像仪<sup>[18]</sup>

为超广角镜头,镜头组由 12 块透镜组成,如图 3 所示,全视场为 118.74°,设计阶段选择合适的材料并提出热控要求<sup>[19]</sup>。组件第一块透镜暴露在外太空中,需要具有良好的抗空间辐照特性,以保护整个物镜。该透镜采用了熔石英材料,抗冲击、耐辐照、热膨胀系数小、化学热稳定性好。利用 ZEMAX 光学软件分析光学系统性能随温度的变化情况,以 865 nm 波段为例,镜头组件在真空状态下,弥散圆均方根半径在视场为 46°时随温度的最大变化量为 1.815 μm,如图 4 所示,焦距随温度的变化量为 7 μm,整个物镜的焦深为 0.18 mm,物镜的光学性能以微量变化。通过仿真计算预估在轨温度对光学系统的影响,并通过几何校正予以评测。

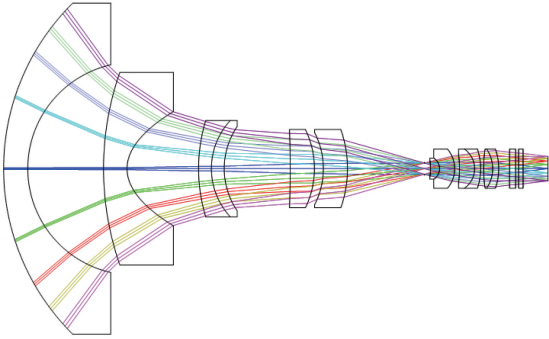


图 3 光学系统示意图

Fig. 3 Diagram of optical system

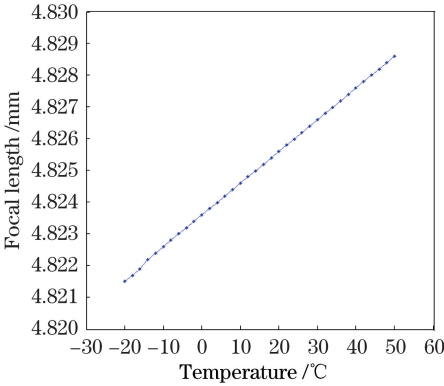


图 4 865 nm 波段焦距随温度变化的曲线

Fig. 4 Focal length at 865 nm band versus temperature

光学探测单元(GP301)电子学系统中探测器组件多个指标均和温度相关,实验室热真空实验数据表明,低温工况下探测器组件温度的稳定范围为 11.5~12.75 °C,高温工况下探测器组件温度稳定范围为 13.6 °C~14.75 °C。综合两种工况情况,需通过温度响应实验获取温度补偿系数,以满足在轨工作需求。

### 3 温度对辐射响应的影响

偏振成像仪为广角镜头,需考虑光学镜头自身

的偏振效应,辐射响应模型为大视场偏振相机辐射模型<sup>[20]</sup>,用斯托克斯矢量表示偏振信息,入射光斯托克斯向量照射到像面( $l, p$ )点对应的像素上,其输出探测器 DN 值可表示为

$$D_{k,a,l,p} = A_k \cdot G \cdot T_{k,a,l,p} [P_{1,k,a,l,p} \cdot I_{k,l,p} + P_{2,k,a,l,p} \cdot Q_{k,l,p} + P_{3,k,a,l,p} \cdot U_{k,l,p}] + C_{l,p}, \quad (1)$$

式中: $k$  代表不同波段; $a$  为偏振片的不同安装方向; $l, p$  为像元坐标; $G$  为相对增益系数(包含电子学放大增益及曝光时间系数); $T$  为透过率响应系数(包含检偏滤光组件相对透过率、光学系统低频透过率和探测器高频响应系数); $C$  为暗背景系数; $A$  为辐射定标系数; $I, Q, U$  为入射光束的斯托克斯向量; $P_1, P_2, P_3$  为仪器偏振特性参数,可表述为与像元视场角  $\theta$  和方位角  $\varphi$  相关的镜头起偏度  $\epsilon$  和偏振片效率  $\chi$  的函数,即

$$\begin{cases} P_{1,k,a}(\theta, \varphi) = 1 + \chi_k \epsilon_k(\theta) \cos[2(\varphi - \alpha_{k,a})] \\ P_{2,k,a}(\theta, \varphi) = \chi_k \cos[2(\varphi - \alpha_{k,a})] + \epsilon_k(\theta) \\ P_{3,k,a}(\theta, \varphi) = \chi_k \sin[2(\varphi - \alpha_{k,a})] \end{cases} \quad (2)$$

基于辐射响应模型分析得到的温度变化影响主要反映在以下两方面: $A_k$  辐射定标系数变化和  $C_{l,p}$  暗背景变化(包括暗电流和热辐射噪声等)。

偏振成像仪光学探测单元具有温度敏感性,不同温度环境下光谱响应度会发生变化,温度校正通过辐射定标系数和暗背景两方面来减小影响。

#### 3.1 辐射定标系数的温度补偿

实验室辐射定标目的是确定仪器响应 DN 值和入射光辐亮度的关系。利用光谱辐射计对积分球辐射源进行标准转递,通过积分球辐射源测量辐射响应度、动态范围、非线性和像元非均匀性等参数,确定辐射定标系数。

温度影响辐射定标系数直接反映在信号输出上,图 5 所示为探测器官方数据中三种工况下的光谱响应曲线,近红外谱段光谱响应度有较大波动,需要通过实验分析来建立温度与辐射响应度之间的关系。

#### 3.2 暗背景影响

偏振成像仪光学探测单元(GP301)结构如图 6 所示,滤光片转轮设有暗背景测量通道,用来实时校正暗背景  $C_{l,p}$  的影响。滤光片转轮转动周期为 8 s,同周期内暗背景通道和探测波段温度特征一致。

设定增益参数后,通过暗背景校正后可获取有效辐射度 DN 值,利用单波段 3 个偏振通道联立解算反演入射斯托克斯向量:

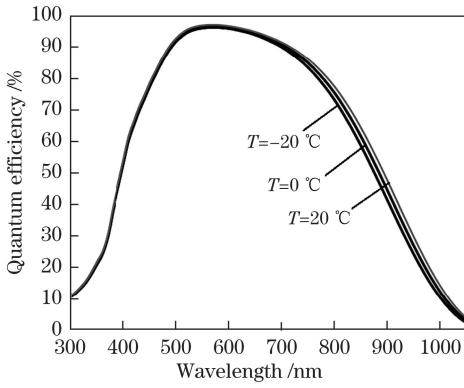


图 5 探测器光谱响应曲线

Fig. 5 Spectral response curve of detector

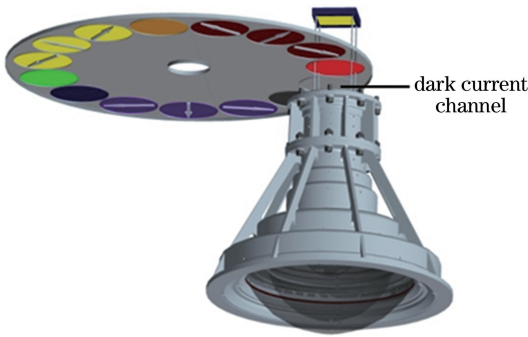


图 6 DPC 成像系统示意图

Fig. 6 Diagram of DPC imaging system

$$\begin{bmatrix} I_{k,l,p} \\ Q_{k,l,p} \\ U_{k,l,p} \end{bmatrix} = (\mathbf{M}_{k,l,p})^{-1} \begin{bmatrix} D_{1,k,l,p} - C_{l,p} \\ D_{2,k,l,p} - C_{l,p} \\ D_{3,k,l,p} - C_{l,p} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中： $D$  为探测信号； $M$  为系统穆勒矩阵。

通过以上两点分析可知，温度对暗背景的影响可以被实时校正，而温度对辐射定标系数的影响需要通过地面实验获取变化关系来校正。

## 4 辐射响应与温度变化测量实验

### 4.1 温度范围和测量点

热控分析的输入条件包括工作温度范围，元器件的名称、数量、尺寸、材料，热容量，热功耗，允许的最高降额温度以及壳体几何参数和热参数，单机内部热控措施等；热分析工况包括极端热工况和极端冷工况，虽然探测器在低温时的暗电流特性更优越，但需要综合考虑整星功耗等条件，以确定探测器组件在轨工作于 11~15 °C 范围，在探测器模块上设立温度监测点，温度监测点的设置经卫星总体单位确认后实施。

常用测温方法有热敏电阻测温、铂电阻测温、热电偶测温和数字传感器测温，星上一般用热敏电阻测温，在此选用了 MF501，并用环氧树脂胶将其固

定在测温点。温度测量 DN 值用一个字节表示，有效范围为 1~254，最大温度范围如图 7 所示，为 -67.96~187.15 °C。

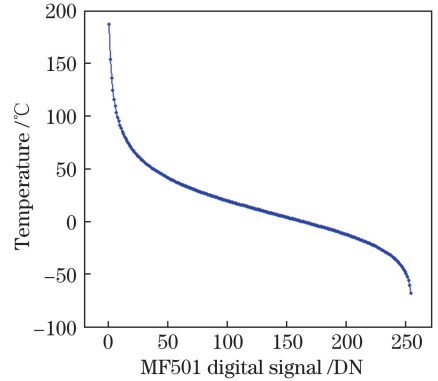


图 7 MF501 测温范围

Fig. 7 Temperature measurement range of MF501

在 -5.197~26.559 °C 范围内，热敏电阻的 DN 值接近线性变化，最小分辨率的变化如图 8 所示，其 11~15 °C 热控范围温度分辨率变化为 0.309~0.320 °C，精度符合要求。

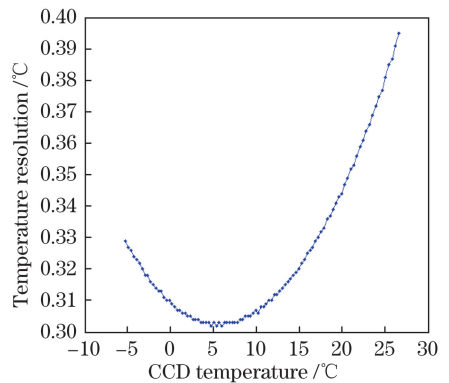


图 8 测温精度变化

Fig. 8 Variation of temperature measurement accuracy

### 4.2 温度响应实验

实验系统模拟了仪器在轨环境，完成了分析辐射响应度与温度关系的实验，获取近红外波段 0~25 °C 内温度变化曲线。所使用的主要设备如表 2 所示；实验洁净间要求洁净度优于 10 万级；产品与实验设备不共地，接地点电阻小于 1 Ω。

通过积分球辐射源 IS1200-400 和真空高低温模拟实验系统 CS-1800 实现辐射响应度与温度的定量化关系测试，实验示意图如图 9 所示。

辐射响应度与温度之间的定量化关系的测试步骤为

1) 将多角度偏振成像仪安装在真空仓平台上，对准积分球辐射源出光口中心；



表 2 实验设备

Table 2 Experimental equipments

Equipment name	Parameter
Standard detector	Wavelength (350-1100 nm)
Spectral radiometer	Wavelength (350-2500 nm)
Integrating sphere source	Wavelength (350-2500 nm)
Two-dimensional turntable	Horizontal scroll (>250 mm)
	Vertical scroll (>100 mm)
Vacuum thermal control system	Temperature range (-175-100 °C)
	Vacuum degree (10 <sup>-3</sup> -101.325 Pa)

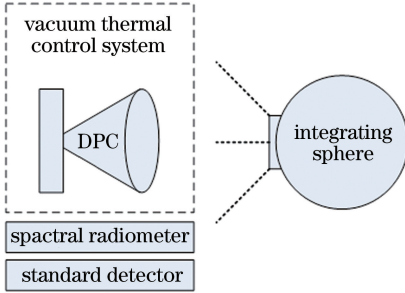


图 9 辐射响应随温度的变化关系测试示意图  
Fig. 9 Diagram of radiation response changing with temperature

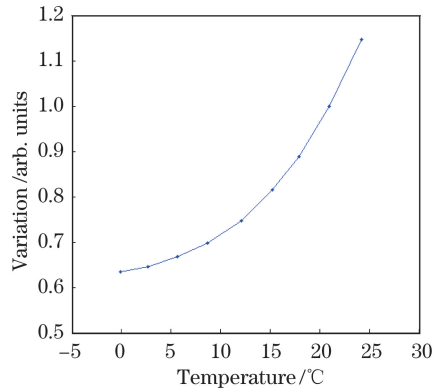


图 10 暗电流变化曲线

Fig. 10 Dark current curve

现电荷转移,在电荷输出过程中,电荷逐行移动输出的同时继续曝光,导致像元响应不均匀<sup>[21]</sup>,通过测量分析探测器帧转移因子,在数据处理中消除帧转移的影响才能得到(2)式中的有效数据,图 11 为帧转移校正前后的对比图,帧转移校正消除了影响信号。

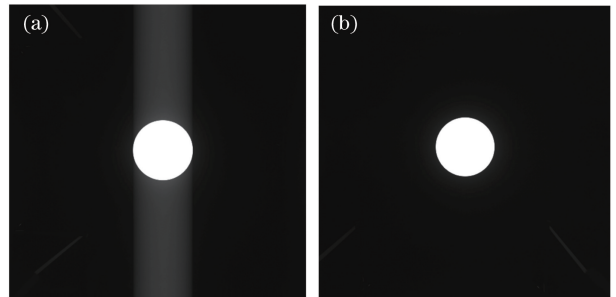


图 11 帧转移校正。(a)原始图像;(b)校正后图像  
Fig. 11 Frame transfer correction. (a) Raw image; (b) corrected image

2) 打开多角度偏振成像仪,设置积分时间,预热至稳定状态;

3) 调节积分球辐射源光谱辐亮度输出,以保证多角度偏振成像仪辐射响应值处于满量程的60%~90%之间,并预热至稳定状态;

4) 热真空系统升温期间,测试多角度成像仪输出响应;

5) 实验过程使用光谱辐射计和标准探测器监测光源光谱变化和辐亮度稳定性。

## 5 实验数据处理

实验数据处理主要包括暗背景校正、帧转移校正、外部光源稳定性补偿和温度区间范围内辐射响应的相对变化计算。

### 5.1 暗背景校正

暗背景主要来源是 CCD 探测器暗电流,图 10 中标注了实际测量的暗背景变化曲线(以 21 °C 测量值为标准),因测试方法、环境不同,实际曲线与理论数据会存在差异,单个电路在整机工作时也会发生变化,说明暗背景通道设计的必要性,在轨工作以暗背景通道进行实时校正。

### 5.2 帧转移校正

探测器选用帧转移体系结构 CCD,帧转移指探测器电荷的转移方式,每个像元既收集光电荷又实

### 5.3 光源监测信号输出

实验过程考虑仪器安全,设置温度缓慢变化,达到热稳定状态时再进行测量,整个实验过程长达 6 h。使用光谱辐射计和标准探测器监控光源变化,其光谱如图 12 所示,覆盖了所要测量的波段。

在整个实验过程中,标准探测器监控光源均匀采集了 3050 个数据,信号变化如图 13 所示,计算最大单点波动偏差为 0.23%[(6.134-6.120)/6.126],测试过程中光源稳定。

### 5.4 实验数据分析

温度  $t$  状态的偏振成像仪波段  $k$  的积分球出光口处辐亮度的测量值用  $L_{k,t}$  表示,其表达式为

$$L_{k,t} = \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} L(\lambda)r(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} r(\lambda)d\lambda}, \quad (4)$$

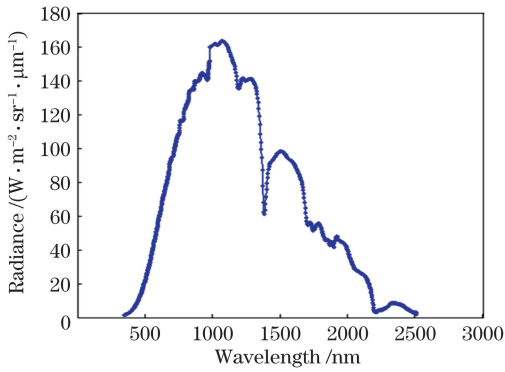


图 12 测试光源光谱

Fig. 12 Spectrum of light source in experiment

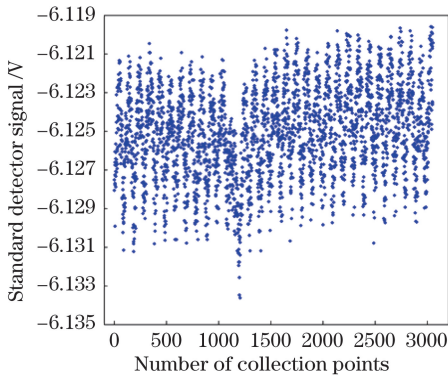


图 13 实验中光源稳定度

Fig. 13 Stability of light source in experiment

式中： $L(\lambda)$ 为参考光源波长 $\lambda$ 的光谱辐亮度，即光谱辐射计实测结果； $r(\lambda)$ 为仪器相对光谱响应率； $\lambda_1, \lambda_2$ 为 $k$ 波段滤光片的上下限波长。在轨温度校正系数是相对温度参考点的相对数值，用偏振成像仪 DN 值等价表示辐亮度，以简化计算。

为提高信噪比，使用 100 组数据有效信号的平均值，通过数据预处理后的有效信号如表 3 所示。

温度响应曲线如图 14 所示，0~25 °C 光谱响应变化趋势和探测器官方数据一致。以温度点 12.089 °C 测量值为标准，计算实验过程中各波段辐射响应值变化波动范围，得到 910 nm 波段辐射响应值的变化波动范围为 -3.47%~3.24%，865 nm 波段辐射响应值的变化波动范围为 -2.19%~2.08%，765 nm 波段辐射响应值的变化波动范围为

-0.15%~0.21%，763 nm 波段辐射响应值变化波动范围为 -0.07%~0.11%。

表 3 响应值随温度的变化情况

Table 3 Response value versus temperature

Temperature / °C	Response values of different wavelengths			
	763 nm	765 nm	865 nm	910 nm
-0.117	4387	3272	4285	6247
2.640	4387	3272	4306	6298
5.670	4389	3275	4329	6352
8.703	4389	3277	4356	6412
12.089	4390	3277	4381	6472
15.255	4391	3279	4404	6526
17.880	4391	3279	4426	6576
20.968	4392	3281	4450	6631
24.243	4395	3284	4472	6682

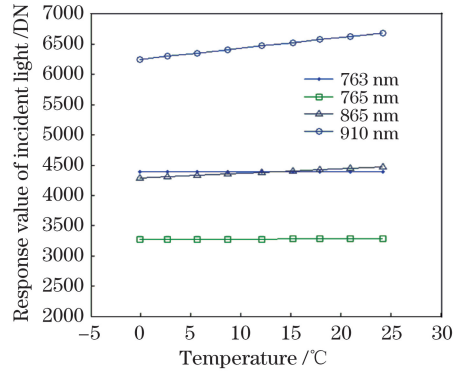


图 14 辐射响应曲线

Fig. 14 Radiation response curves

数据表明通过暗背景通道设计可以有效地消除温度对暗背景的实际影响，0~25 °C 温度范围内光谱响应数据变化趋势和探测器官方数据一致，11~15 °C 工作温度范围内 910 nm、865 nm 波段光谱响应数据变化较为明显，需要在轨进行温度校正。

## 6 在轨温度补偿方法

工作温度范围内的实验数据近似呈线性变化，采用拟合方式得到 0~25 °C 温度补偿曲线，拟合的表达式为： $f(x) = f_1x^3 + f_2x^2 + f_3x + f_4$ ，其中  $f_1, f_2, f_3, f_4$  为多项式系数， $x$  为各温度点响应值，拟合输出结果如表 4 所示。

表 4 温度影响变化率计算

Table 4 Variation rate of temperature effect

Band /nm	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	Variety /( $10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )(11-15 °C)	Total range /%
910	-0.0024420	0.04611	18.2100	6249	2.801	1.121
865	-0.0021213	0.02968	7.6950	4286	1.685	0.674
765	0.0011660	-0.04058	0.8069	3271	0.105	0.042
763	0.0010250	-0.03134	0.4879	4387	0.042	0.0168

在热控温度范围及极限工况条件下,温度变化主要影响近红外 865 nm 和 910 nm 波段,其中 865 nm 波段温度影响变化率为  $1.685 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , 910 nm 波段温度影响变化率为  $2.801 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , 在 11~15 °C 热控区间,两波段总辐射响应度分别波动 0.674% 和 1.121%。

地面应用系统处理数据的流程如图 15 所示,偏振成像仪原始数据经过数据预处理后,首先进行温度校正,再进行辐射、几何校正,输出 1 级数据产品。

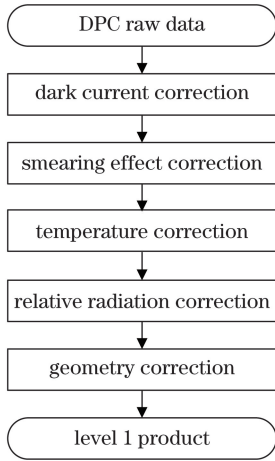


图 15 数据处理流程图

Fig. 15 Flow chart of data processing

温度校正中以表 4 中的系数作为补偿系数,从接收的载荷数据中提取探测器组件温度值,计算相对 13 °C 温度点的校正系数,校正公式为

$$L = L_0 [1 + (T - 13) \cdot f_x], \quad (5)$$

式中:  $T$  为探测器组件温度;  $L_0$  为实际输出辐亮度值;  $f_x$  为 13 °C 温补计算系数;  $L$  为温度校正后输出的辐亮度值。采用热控设计和温度补偿方法后,温度波动产生的辐射度误差小于 0.1%, 在可控范围内。

目前载荷热控工作良好,控温稳定,在轨工作物镜、电路盒、探测器组件温度的变化如图 16 所示,数据为在轨工作 3 个月后性能稳定时的数据。可以看出,物镜温度变化在 10~11 °C 之间,电路盒温度变化在 10~13 °C 之间,探测器组件温度变化在 12~13 °C 之间,变化稳定,控温范围在热设计指标内,达到了预期目的。

在轨探测器组件温度监测结果如表 5 所示,从 2018 年 5 月 10 日开机至 2018 年 10 月 7 日,在运行工作 2300 轨数据中随机挑选了 10 组数据,包括 2018 年 9 月 11 日连续的三轨数据,可以看出探测器组件工作在设计范围内。

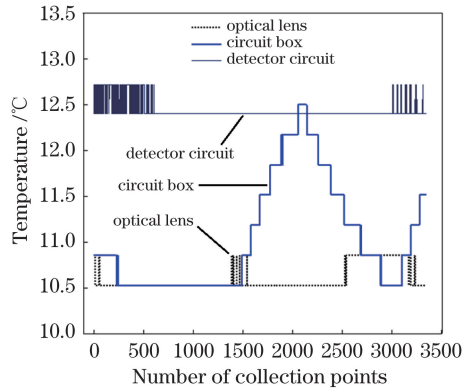


图 16 测温点温度变化曲线

Fig. 16 Temperature change curve of measuring point

表 5 在轨探测器组件温度监测表

Table 5 Temperature monitoring table of on-orbit

detector module				°C
Coordinated universal time	Maximum	Minimum	Average	
20180510T10:40—11:26	12.714	12.401	12.704	
20180528T18:26—20:45	13.028	12.714	12.715	
20180604T10:14—11:00	12.714	12.401	12.704	
20180717T16:59—17:45	12.401	12.401	12.401	
20180819T13:05—13:50	12.714	12.401	12.685	
20180820T10:29—11:15	12.714	12.401	12.503	
20180911T01:21—02:07	12.714	12.401	12.687	
20180911T04:39—05:12	12.714	12.401	12.649	
20180911T06:18—07:03	12.714	12.401	12.624	
20181007T08:13—08:59	12.714	12.401	12.697	

## 7 结 论

为保证在大气常温条件和在轨热真空环境下多角度偏振成像仪均能稳定可靠的工作,进行了热控分析。运行阶段需要校正控温范围内温度波动带来的偏差,通过分析光学系统和偏振探测的温度影响因素,发现温度变化对暗背景及近红外波段辐射定标系数影响较大,实验表明 910 nm、865 nm 波段在极端工况条件 11~15 °C 区间最大范围波动分别达到 1.121% 和 0.674%。暗背景通道设计和温度补偿系数校正可有效消除温度变化的影响,在轨运行以来,热控工作良好,探测器电路工作在理想温度范围,温度校正满足数据质量要求,温度校正方法合理。后续仪器研制可通过设定较低的控温点来提高信噪比,用 12 bit 的模数转换器件提高温度分辨率。

## 参 考 文 献

[1] Diner D J, Chipman R A, Beaudry N A, *et al.* An integrated multiangle, multispectral, and polarimetric imaging concept for aerosol remote

- sensing from space[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5659: 88-96.
- [2] Böttger U, Preusker R, Nieke J. Radiative transfer model STORM for full Stokes vector calculations for a plane parallel atmosphere-surface-system [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5979: 59791V.
- [3] Kang Q, Li J J, Chen L G, *et al.* Test and uncertainty analysis of reference source with variable polarization degree and large dynamic range[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0412003.  
康晴, 李健军, 陈立刚, 等. 大动态范围可调线性偏振度参考光源检测与不确定度分析[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0412003.
- [4] Zhang M M, Meng B H, Luo D G, *et al.* Measurement precision verification and deviation analysis of spaceborne directional polarimetric camera [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0812004.  
张苗苗, 孟炳寰, 骆冬根, 等. 星载多角度偏振成像仪测量精度验证与偏差分析[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0812004.
- [5] Zhu B Q, Yuan Y L, Kang Q, *et al.* Research on calibration method of in-band relative spectral responsivity of polarization remote sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0712005.  
朱冰青, 袁银麟, 康晴, 等. 偏振遥感器带内相对光谱响应度定标方法研究[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0712005.
- [6] Gu M L. Methods for the in-flight absolute radiation calibration of space-borne remote sensors [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2000, 21(1): 16-21, 25.  
顾名澧. 星载遥感器在飞行时的绝对辐射定标方法[J]. 航天返回与遥感, 2000, 21(1): 16-21, 25.
- [7] Gao C X, Jiang X G, Ma L L, *et al.* Review of radiometric cross-calibration [J]. Arid Land Geography, 2013, 36(1): 139-146.  
高彩霞, 姜小光, 马玲玲, 等. 传感器交叉辐射定标综述[J]. 干旱区地理, 2013, 36(1): 139-146.
- [8] Torres B, Dubovik O, Toledano C, *et al.* Sensitivity of aerosol retrieval to geometrical configuration of ground-based sun/sky radiometer observations [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(2): 847-875.
- [9] Dubovik O, King M D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2000, 105(D16): 20673-20696.
- [10] Dubovik O, Smirnov A, Holben B N, *et al.* Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from aerosol robotic network (AERONET) sun and sky radiance measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2000, 105(D8): 9791-9806.
- [11] Liu B L, Zhou Z X, Li J, *et al.* Thermal control technology for optical antenna in geostationary orbit space satellite-borne laser communication [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0306003.  
刘百麟, 周佐新, 李健, 等. 地球静止轨道空间星载激光通信光学天线热控技术[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0306003.
- [12] Liu Z Y, Cheng H E, Sun J L. Thermal control design and analysis of remote sensor onboard geostationary satellite[J]. Chinese Space Science and Technology, 2009, 29(3): 29-35.  
刘振宇, 程惠尔, 孙敬良. 同步轨道遥感器热设计和热分析[J]. 中国空间科学技术, 2009, 29(3): 29-35.
- [13] Liu W D, Luo Z B, Li X, *et al.* Optimized design of baffle for laser communication system on geostationary orbit [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0206005.  
刘伟达, 罗忠宝, 李响, 等. 地球静止轨道激光通信系统的遮光罩优化设计[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0206005.
- [14] Hu B T, Xu T, Jiang S C, *et al.* Thermal control design of multi channel scanning imagery Radiometer [J]. Infrared Technology, 2011, 33(3): 141-146.  
胡炳亭, 徐涛, 江世臣, 等. 多通道扫描成像辐射计热设计[J]. 红外技术, 2011, 33(3): 141-146.
- [15] Zhu J G, Guo T H, Zhang T, *et al.* Thermally-induced error of the length measurement method based[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(1): 254-259.  
郑继贵, 郭庭航, 张涛, 等. 基于光电振荡器的长度测量方法温度误差[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 254-259.
- [16] Liu Y D, Liu J, Zhu H J, *et al.* Temperature compensation method for MEMS accelerometer based on resonant frequency [J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2015, 48(7): 658-662.  
刘义冬, 刘杰, 朱辉杰, 等. 基于谐振频率的微机械加速度计温度补偿方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(7): 658-662.
- [17] Wang G Q, Shen X, Wang W C, *et al.* On board adaptation of temperature of the FY-4 meteorological satellite radiation imager[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37(5): 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[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(5): 540-544.



- [18] Yang W F, Hong J, Qiao Y L. Optical design of spaceborne directional polarization camera [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0822005.  
杨伟锋, 洪津, 乔延利. 星载多角度偏振成像仪光学系统设计 [J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0822005.
- [19] Zhang P, Jin G, Zhang Y, *et al.* Thermal effects on figuration of space membrane mirrors [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12): 2432-2436.  
张鹏, 金光, 张元, 等. 温度对空间薄膜反射镜成形影响 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2432-2436.
- [20] Chen L G. Polarimetric calibration of the polarization CCD camera with large viewing field [J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(2): 15-20.  
陈立刚. 大视场偏振 CCD 相机的偏振特性实验标定 [J]. 光电工程, 2015, 42(2): 15-20.
- [21] Powell K, Chana D, Fish D, *et al.* Restoration and frequency analysis of smeared CCD images [J]. Applied Optics, 1999, 38(8): 1343-1347.