

星载面阵成像型红外地球敏感器非均匀性校正

崔维鑫^{1*}, 李响², 孙浩¹, 徐增闯¹, 李勇¹, 于远航¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 航天系统仿真重点实验室 北京仿真中心, 北京 100854)

摘要: 针对高轨面阵红外地球敏感器在轨温度交变引起的系统非均匀性变化现象, 提出一种在轨非均匀性校正的光机设计方案。小型化、轻量化、长寿命的光机系统包括标定黑体组件和光学成像系统。在分析系统非均匀性校正机理和影响的基础上, 重点研究了标定黑体组件和光学系统选型及设计之间的关系, 并在地面验证了系统非均匀性校正效果。利用在轨地球成像数据对系统的非均匀性进行了效果评估, 评估结果表明满足在轨应用要求。

关键词: 地球敏感器; 在轨非均匀性; 标定黑体; 光学设计

中图分类号: TN215

Area array infrared earth sensor heterogeneity non-uniformity correction design

CUI Wei-Xin^{1*}, LI Xiang², SUN Hao¹, XU Zeng-Chuang¹, LI Yong¹, YU Yuan-Hang¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200083, China;

2. Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China)

Abstract: Aiming at the phenomenon of non-uniformity change caused by on-orbit temperature change of the high-orbit area array infrared earth sensor, an optical-mechanical implementation scheme for on-orbit non-uniformity calibration is proposed. The miniaturized, lightweight, and long-life optomechanical system includes calibration blackbody components and optical imaging systems. The system includes surface source blackbody, motion control mechanism, and optical imaging system. Based on the analysis of the necessity and mechanism of system non-uniformity correction, the relationship between the selection and design of surface source blackbody, motion control mechanism and optical system is studied, and the simulation design of each group of components is realized. Based on the simulation results, the effects and advantages of system heterogeneity calibration are analyzed and compared. The effect of the heterogeneity of the system is evaluated by using the orbiting earth imaging data, and the evaluation results show that the requirements for on-orbit application are met.

Key words: infrared earth sensor, non-uniformity correction, calibrated black body, optical design

PACS:

引言

卫星姿态测量是卫星在轨实现姿态控制、完成空间飞行任务的必要条件之一。而作为姿态测量设备, 红外地球敏感器广泛用于各类卫星平台, 主要用于卫星初始入轨时对地球的捕获及稳态运行

时卫星的姿态控制, 已成为不可或缺的姿轨控分系统配套单机之一^[1-3]。红外地球敏感器是将地球作为姿态参考目标源, 通过红外光学探测手段获取地球红外地平圆信息, 确定地平圆中心, 从而获取“局地垂线”矢量在仪器坐标系中的指向, 由此实现卫

收稿日期: 2020-11-02, 修回日期: 2021-04-21

Received date: 2020-11-02, Revised date: 2021-04-21

基金项目: 国家重点研发计划(2017YF0111403), 中国科学院专项(XDA15013100)

Foundation items: Supported by the National Key Research and Development plan (2017YF0111403), Chinese Academy of Sciences Strategic Pilot Project (XDA15013100)

作者简介(Biography): 崔维鑫(1964-), 男, 研究员、博士研究生导师, 主要从事空间飞行器及其天文自主导航姿态光学敏感技术、红外光电技术及系统工程、微弱信号检测与图像信息处理技术和空间精密机械设计与长寿命空间润滑技术等专业研究方向

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

星滚动、俯仰姿态偏差的测量,在一定测角范围内向星载计算机提供卫星俯仰和滚动两轴姿态信息,其姿态敏感原理图如图1所示。

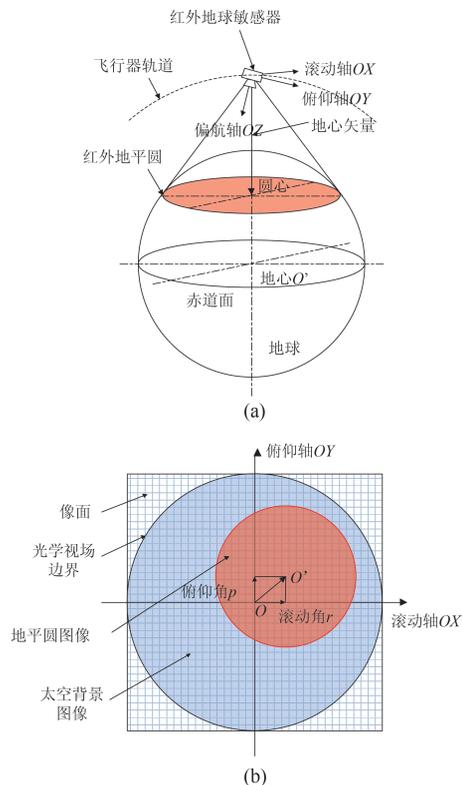


图1 红外地球传感器姿态敏感原理示意图 (a) 红外地球传感器与地球空间几何位置关系, (b) 姿态敏感原理

Fig. 1 Schematic diagram of attitude sensitivity principle of infrared earth sensor (a) the geometric position relationship between, (b) the principle of attitude sensitivity infrared earth sensor and the earth space

由于卫星平台在轨工作时受空间辐射和太阳的照射的影响,在不同温度下,红外地球传感器自身红外辐射通量密度变化较大^[4-6]。只针对一个温度进行非均匀性校正,其它温度点的红外辐射通量密度变化对系统的信噪比影响较大,系统精度无法满足使用要求。因此,面阵红外地球传感器在轨工作时需要进行在轨非均匀性校正^[7-8]。

红外图像非均匀性校正的方法有很多,基本分为两类:基于参照源和基于场景的自适应校正方法^[9]。基于参照源的校正方法要求在特定温度的黑体均匀辐射下,对红外探测器进行定标,主要有两点定标法或多点定标法。基于场景的方法不需要黑体标定,而是根据场景的运动,在每个像素上产生场景温度的变化。这些温度变化依次提供统计参考点,依照这些参考点,探测器的非均匀性响应

即可校正。

本文针对新一代北斗导航卫星平台对红外地球传感器的高精度需求,分析了卫星平台所处空间环境温度变化对系统精度的影响,提出了基于参照源非均匀性校正方法的光机实现方案,建立了小型化、轻量化、长寿命的非均匀性校正的光机系统,实现了系统在轨的非均匀性校正。

1 非均匀性校正总体方案设计

红外地球传感器非均匀性校正的实现形式主要由红外光学系统、标定组件和标定黑体控制电路组成。其中,1)红外光学系统对红外地平圆进行光学成像;2)标定组件对红外探测器的非均匀性进行在轨校正;3)标定黑体控制电路:通过单机内部CPU控制黑体控制电机,使得黑体闭合或打开,并采集2个霍尔器件的输出信号,确定黑体的位置信息,即黑体的闭合状态。红外地球传感器选用的在轨非均匀性校正方法,是将实时获取的目标图像与周期性采集的标定黑体校正图像作差而实现图像非均匀性实时校正,消减光机系统温度变化对图像非均匀性的影响。

1.1 光学系统设计

本文所涉及的卫星平台轨道高度为36 000 km,地球半径6 371 km,二氧化碳层厚度为40 km,地平圆对应的张角为 17.41° 。考虑在轨保证一定测角范围 $\pm 16^\circ$,本文选取全视场角 50° 。光学系统采用了孔径光阑前置的结构形式,保证出瞳距离无穷远,实现像方远心光路,保证系统像面照度的均匀性。

系统选用锗单晶(GE)和硒化锌(ZNSE)材料作为透镜材料进行优化设计。GE和ZNSE材料在 $14\sim 16.25\ \mu\text{m}$ 具有良好的透过性能,且GE和ZNSE材料在该波段的折射率较高,且在该波段范围内两种材料的折射率随波长的变化很小,有利于系统校正初级和高级像差。对于焦距较短的光学系统,色差对像质的影响可以忽略,对于视场角较大的情况下,系统会产生较大的轴外初级像差和高级像差,结合系统的结构形式,系统所有光学元件都位于孔径光阑之后,像差校正难度较大,同时需满足像方远心结构。因此,系统在设计时引入了高次非球面进行像差校正。

根据上述分析,采用如图2所示的结构进行优化设计,系统在光线入射角度大和入射高度大的光学表面引入了高次非球面,分别为透镜1后表面、透

镜2后表面、透镜3前表面,考虑加工工艺难度,使用旋转对称的非球面结构,高次项不高于6次。通过优化设计,最终实现的光学系统参数如表1所示。

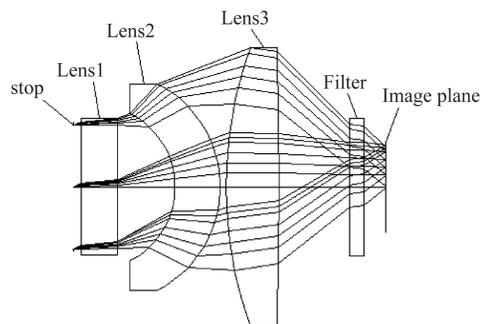


图2 红外地球敏感器光学系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of infrared earth sensor optical system

表1 光学系统参数

Table 1 Optical system parameters

| | |
|----------------------------|--------------------------|
| Wavelength/ μm | 14 ~ 16.25 μm |
| Field | $\pm 25^\circ$ |
| Entrance pupil diameter/mm | 8.66 |
| F/# | 0.8 |
| Focal length/mm | 5.1 |
| Back working distance/mm | 7.5 |
| Optical material | GE/ZNSE |
| Total length/mm | 21.9 |
| Weight/g | 10 |

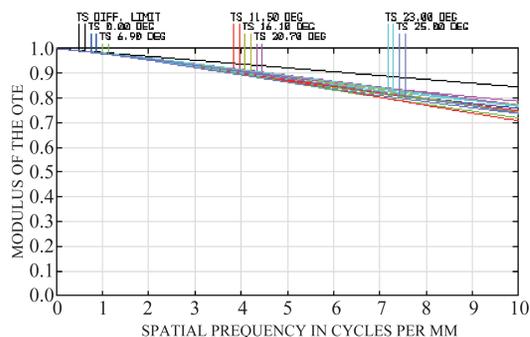


图3 调制传递函数

Fig. 3 Modulation transfer function

图3为光学系统的调制传递函数(MTF)曲线图,横坐标和纵坐标分别为像面位置空间频率和光学系统的传递函数值。根据红外地球敏感器单机实际算法,系统将探测器两个像元合并使用,因此系统的实际空间截止频率为10 lp/mm,根据图示系统的MTF最小值为0.708,接近系统的衍射极限,满足系统成像要求。

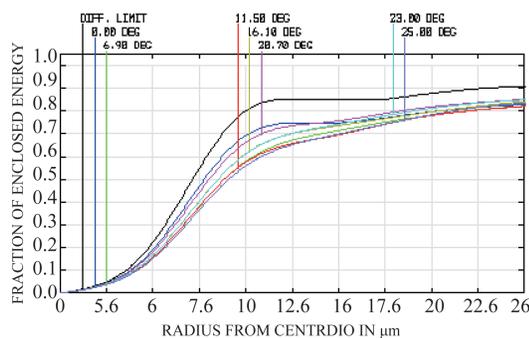


图4 径向能量分布曲线

Fig. 4 Radial energy distribution curve

图4为光学系统各个视场的径向能量集中度分布曲线,横坐标为像点光斑半径,纵坐标为能量集中度。按照两个像元合并使用,由图可见系统各个视场的80%能量都集中在小于25 μm 的圆内。满足使用要求。图5为光学系统像面照度均匀性曲线,横坐标为视场角,纵坐标为像面上的相对照度值,由图可见,系统的最小相对照度为0.979。

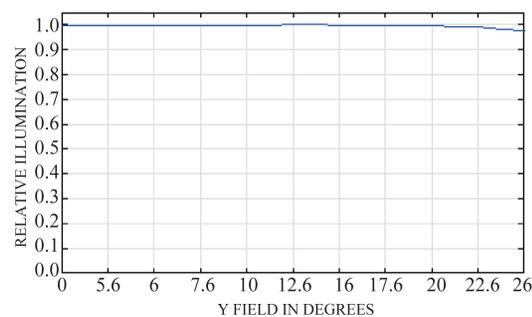


图5 像面照度均匀性曲线

Fig. 5 Uniformity curve of image surface illuminance

1.2 标定组件设计

采用双稳态位置电机驱动标定黑体,将黑体置于光学系统前,完成对红外探测器的标定,标定组件的工作原理图如图6所示。标定组件安装于光学系统前。红外地球敏感器工作时,红外标定黑体停靠在光学系统视场范围以外。当对探测器进行标定时,对双稳态位置电机通正向电流,标定黑体转动到光学系统前面并遮挡所有视场。标定结束后,对电机通反向电流,标定黑体转动并停靠在光学系统视场的外部。标定黑体的运动方式为间歇性摆动。

2 非均匀性校正验证

红外探测器像元的非均匀性严重程度不同,仅凭主观的观测判断,难以证明红外探测器成像的好坏,因此需要寻找一个量化的指标来衡量。在均匀

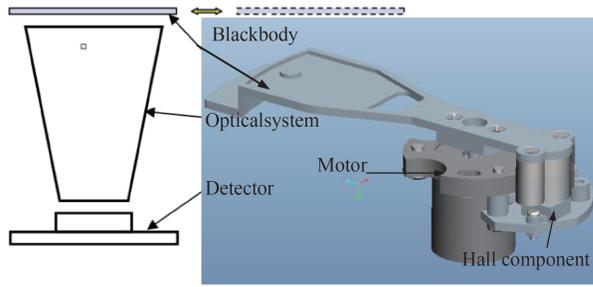


图6 标定组件工作原理图

Fig. 6 Working principle diagram of calibration components

辐射下,焦平面上的探测器像元之间的光响应并不相同,式1为国家相关单位制定的标准中的关于焦平面非均匀性的定义^[9]。其规定了焦平面阵列的非均匀性量化方式,规定在辐射量均匀入射的条件下,焦平面阵列像元输出值的均方误差与输出平均值的百分比(计算均不包括坏元)。假设窗体大小为 $M \times N$ (单位像元)则该窗口内图像非均匀度定义为:

$$U_R = \frac{1}{\bar{y}} \sqrt{\frac{1}{M \cdot N - (d + h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [y_{ij} - \bar{y}]^2}, \quad (1)^{[9]}$$

y_{ij} 为探测元 (i, j) 黑体响应值, d 和 h 为死像素和过热像素个数。

\bar{y} 是排除死像素和过热像素后的平均值。

2.1 地面非均匀性校正

红外探测器在不同温度下非均匀性程度不同,图7分别是24.83℃、27.62℃、28.33℃、30.4℃情况下,目标图像与背景图像相减的结果。

根据非均匀度式(1),计算不同温度下探测器图像(图像大小为480×480像素)的非均匀度如表2所示。

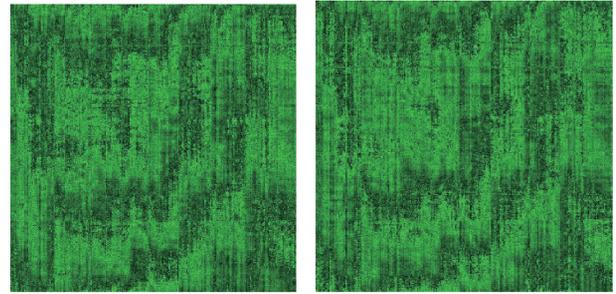
基于黑体标定法的方案设计,其主要工作原理是在一定的时间间隔期内,将标定黑体置于光学系统前,完成探测器的标定,获取当前探测器的图像作为背景图像,解决温度交变引起的探测器的非均匀性问题。

以24.83℃背景为校正图像,基于黑体标定法进行非均匀性校正,获得三幅校正后图像如图8所示,不同温度下校正后图像(图像大小为480×480像素)的非均匀度计算值如表3所示。

由表2以及表3可知,基于黑体标定法校正后的图像非均匀度由3%左右下降至0.1%,降低了一个数量级,基于黑体标定法可以较好的解决不同温度环境下探测器图像的非均匀度问题。

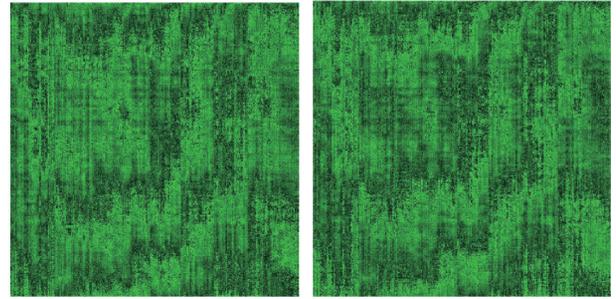
2.2 在轨非均匀性校正

为验证本文非均匀性校正方案的有效性,通过



(a)

(b)



(c)

(d)

图7 不同温度下背景图像 (a) 24.83℃, (b) 27.62℃, (c) 28.33℃, (d) 30.4℃

Fig. 7 Background images at different temperatures (a) 24.83℃, (b) 27.62℃, (c) 28.33℃, (d) 30.4℃

表2 不同温度下探测器图像非均匀度

Table 2 Non-uniformity of detector image at different temperatures

| 温度 | 24.83℃ | 27.62℃ | 28.33℃ | 30.49℃ |
|------|---------|---------|---------|---------|
| 非均匀度 | 0.033 1 | 0.032 8 | 0.032 7 | 0.032 6 |



(a)

(b)

(c)

图8 不同温度下校正图像 (a) 27.62℃, (b) 28.33℃, (c) 30.4℃

Fig. 8 Corrected images at different temperatures (a) 27.62℃, (b) 28.33℃, (c) 30.4℃

表3 不同温度下校正后探测器图像非均匀度

Table 3 Non-uniformity of detector image after correction at different temperatures

| 温度 | 27.62℃ | 28.33℃ | 30.49℃ |
|------|---------|---------|---------|
| 非均匀度 | 0.001 0 | 0.001 3 | 0.002 0 |

红外地球敏感器在轨实际下传图像分析校正效果。图9为红外地球敏感器在轨采集的目标图像。图10

为红外地球敏感器地面采集的目标图像。由于目标的灰度值会对非均匀度计算结果产生影响,因此仅在无地平圆目标处随机选取 50×50 像素,计算比较在轨图像与地面图像的非均匀度。其中在轨图像采集温度为 21°C ,地面采集温度为 24.83°C 。由表4可以看出,在轨校正图像与地面校正图像非均匀度较为接近,可以认为,本文设计的非均匀性校正方法的在轨应用达到了较好的校正效果。

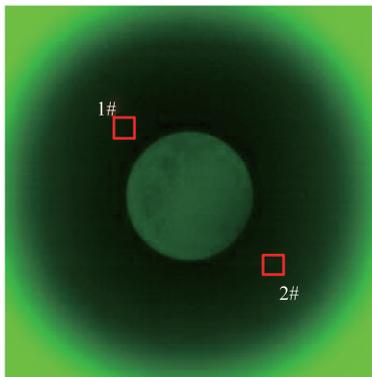


图9 校正后在轨探测器图像

Fig. 9 Image of the on-orbit detector after correction

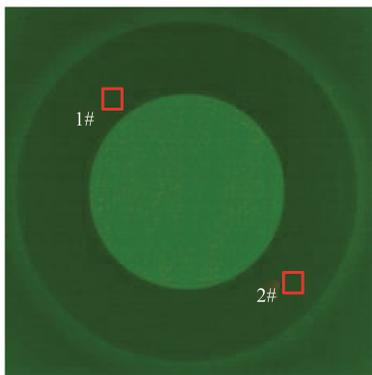


图10 校正后地面探测器图像

Fig. 10 Image of the ground detector after correction

表4 在轨图像与地面图像非均匀度对比

Table 4 Non-uniformity contrast between on-orbit image and the ground image

| | 1# | 2# |
|------|--------|--------|
| 在轨图像 | 0.1214 | 0.1872 |
| 地面图像 | 0.1250 | 0.0991 |

3 结论

本文分析了红外地球敏感器在不同环境温度

下引发的非均匀性产生机理,优化设计了光学系统和标定组件,在地面和在轨进行了非均匀性校正验证,结果表明含目标的在轨校正图像与地面校正图像非均匀度较为一致,表明红外地球敏感器的标定方案在轨实际应用中达到了非均匀性校正目的。

References

- [1] ZHOU Jun, QIAN Yong. Research on the correction algorithm of the measurement value of the infrared horizontal instrument based on the flatness of the earth [J]. *Journal of Astronautics* (周军,钱勇.基于地球扁率红外地平仪测量值修正算法研究. *宇航学报*), 2003, **24**(2): 144-149.
- [2] LI Mao-Deng, JING Wu-Xing, HUANG Xiang-Yu. Autonomous navigation system based on sun-earth-moon orientation information with earth's oblateness correction [J]. *Journal of Astronautics* (李茂登,荆武兴,黄翔宇.考虑地球扁率修正的基于日地月方位信息的地球卫星自主导航. *宇航学报*), 2012, **33**(5): 577-583.
- [3] Mohammed A M S, Benyettou M, Bentoutou Y, et al. Three-axis active control system for gravity gradient stabilised microsatellite [J]. *Acta Astronautica*, 2009, **64**(7-8): 796-809.
- [4] TU Bi-Hai, YAO Ping-Ping, MENG Bing-Huan, et al. Research on non-uniformity correction of detector for directional polarimetric camera [J]. *Acta Photonica Sinica* (涂碧海,姚萍萍,孟炳寰,等.多角度偏振成像仪探测器非均匀性校正研究. *光子学报*), 2020, **49**(9): 0911002.
- [5] SU Yu-Yang, WANG Zhi-Le, LU Min, et al. Nonuniformity analysis and correction of DMD imaging in infrared target simulation system [J]. *Journal of Applied Optics* (苏渝阳,王治乐,陆敏,等.红外目标模拟系统DMD成像非均匀性分析及校正. *应用光学*), 2020, **41**(5): 1074-1081.
- [6] LV Bao-Lin-, TONG Shou-Feng, XU Wei, et al. Non-uniformity correction of airborne infrared detection system based on inter-frame registration [J]. *Chinese Optics* (吕宝林,佟首峰,徐伟,等.基于配准的机载红外非均匀性校正技术应用. *中国光学*), 2020, **13**(5): 1124-1137.
- [7] YIN Jia-Qi, WANG Shi-Yong, ZHANG Rui, et al. Calibration and non-uniformity correction of near-infrared polarization detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (尹佳琪,王世勇,张瑞,等.近红外偏振探测器的定标及非均匀性校正. *红外与毫米波学报*), 2020, **39**(2): 235-240.
- [8] LI Xiang, LI Jin-Dong, SUN He-Zhi. Influencing factors of temperature and infrared characteristics of space target [J]. *Laser Infrared* (李享,李劲东,孙鹤枝,等.空间目标温度与红外特性影响因素研究. *激光与红外*), 2019, **49**(12): 1436-1441.
- [9] XING Su-Xia. *Infrared thermal imaging and signal processing* [M]. Beijing: National Defense Industry Press (邢素霞. *红外热成像与信号处理*.北京:国防工业出版社), 2011.