

文章编号 1004-924X(2010)07-1491-07

离轴三反宽视场空间相机的辐射定标

任建伟¹, 刘则洵^{1,2}, 万志¹, 李宪圣¹, 任建岳¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:离轴三反(TMA)光学系统是目前最先进的空间对地观测相机的光学系统。本文在分析离轴 TMA 宽视场空间相机成像机理的基础上, 针对其光学系统光路和结构的特点, 提出了分视场定标和利用特殊开口形状积分球的全视场定标两种方案, 并采用两种定标方案分别对离轴 TMA 宽视场空间相机两个不同阶段的样机进行了实验室辐射定标, 定标结果表明两种方案切实可行, 满足该相机实验室辐射定标要求。通过对提出的两种实验室辐射定标方案优缺点的分析, 得出两种定标方案不同的使用条件, 结果显示两种定标方案的定标精度分别为 1.68% 和 1.89%。

关键词:离轴三反(TMA)系统; 空间相机; 辐射定标

中图分类号: V475.3; TP73 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20101807.1491

Radiometric calibration of off-axis three-mirror-anastigmat space camera with wide viewing field

REN Jian-wei¹, LIU Ze-xun^{1,2}, WAN Zhi¹, LI Xian-sheng¹, REN Jian-yue¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: Off-axis Three-Mirror-Anastigmat(TMA) optical system is a most advanced optical system used in space cameras for earth observation presently. In this paper, the imaging mechanism of a off-axis TMA wide viewing field space camera is analyzed, and two kinds of calibration projects, sectional viewing field radiometric calibration and entire viewing field radiometric calibration using an especial hatch integrating sphere, are proposed according to the path and construction features of the off-axis TMA optical system. Then, Both the projects are used in the laboratory radiometric calibration for the different phase specimens of the off-axis TMA space camera. The calibration result indicates that both of the projects are feasible and can fully satisfy the requirements of laboratory radiometric calibration. The service conditions of the two projects are obtained by analyzing the relative merits of the projects. It is concluded that the calibration accuracies of two projects are 1.68% and 1.89%, respectively.

Key words: off-axis Three-Mirror-Anastigmat(TMA) system; space camera; radiometric calibration

收稿日期: 2009-06-25; 修订日期: 2009-08-26.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 863-2-5-1-13B)

1 引言

空间光学相机的光学系统经历了从折射系统、折反系统到全反系统的演变。目前采用的三反消像散(TMA)全反射系统有同轴 TMA 系统和离轴 TMA 系统两种。TMA 系统的特点是不存在色差和二级光谱,适合宽谱段范围的成像,设计灵活,既可以利用折转反射镜折叠光路缩小体积,又可以使用非球面镜获得长焦距、大视场、大孔径的组合。同轴 TMA 系统的优点是结构紧凑,装调难度小,但有中心遮拦,降低了入瞳能量,在理论上像质比同样的无遮拦系统低一些。离轴 TMA 系统由于没有中心遮拦,提高了焦面照度水平,在理论上调制传递函数(MTF)较高,可以实现较大视场(包括线视场和面视场),获得接近理想的成像性能和效果,是空间光学相机光学系统的发展方向。

空间光学相机的实验室辐射定标是光学遥感及工程研制的一项重要工作内容,其目的是建立相机最终信号输出与输入辐射亮度之间的函数关系,作用是实现相机信号输出和辐射输入范围的匹配;相机信号输出和辐射输入的定量化;以及校正图像元之间相对辐射响应的差异。

从辐射度学角度考虑,空间相机实验室辐射定标基本采取全孔径、全视场、端对端(光学辐射输入到最终信号输出)的辐射亮度定标方法^[1]。全孔径是指扩展辐射源面积必须大于被定标相机入瞳面积,并充满相机孔径角;全视场是指扩展辐射源的发散角必须大于相机的总视场;端对端指的是定标结果要包含所有影响相机响应性能的元器件和部件的系统响应关系。

采用常规光学系统的空间相机,如透射式或同轴 TMA 系统,相机孔径光阑的位置大多位于相机主镜镜框处,因此,实验室辐射定标所用的扩展辐射定标光源尺寸大于相机主镜口径即可满足辐射定标要求。但是由于离轴 TMA 光学系统光路的结构特点,使得扩展辐射定标光源无法靠近相机主镜,特别是对于具有超大视场(视场角:10~20°)的离轴 TMA 光学系统的空间相机,其前置的遮光罩开口长度较长,为此需要采用超大扩

展辐射定标光源才能够满足全孔径、全视场的辐射定标要求。然而超大扩展辐射定标光源的研制难度大、加工成本高,因此如何采用小口径辐射定标设备实现离轴 TMA 宽视场空间相机的辐射定标,已成为该项研究中亟待解决的问题。

积分球光源是一种较为理想的均匀漫射扩展光源,是已经被公认的用于空间光学相机辐射定标的较为理想的扩展辐射光源。该扩展光源经过辐射量值传递后,可准确定标出积分球开口处的光谱辐射亮度,并以此作为标准对空间光学相机进行辐射定标,因此依托积分球扩展辐射源的辐射亮度和相机的输出的关系可以建立被定标相机的辐射响应方程,由此可实现相机的信号输出与景物辐射亮度范围匹配关系的标校;输入辐射量与相机输出信号间的转换函数的定量化;图像像元间相对响应关系,信噪比、零辐射电平的定标等^[2]。

本文针对离轴 TMA 宽视场空间相机光学系统的特殊性,考虑积分球光源在辐射定标中的优势,提出了分视场定标和利用特殊开口形状积分球的全视场定标两种方案,采用提出的方案,很好地实现了对离轴 TMA 宽视场空间相机的实验室辐射定标。

2 离轴 TMA 光学系统成像特点与结构

在空间对地遥感领域中,无论军事还是民用领域对光学系统的要求都越来越高。反射式光学系统以其无色差、结构紧凑、易于轻量化等优点获得人们更多的关注,已经被广泛应用于在轨高分辨率、多光谱等地观测中,而其中没有中心遮拦的离轴 TMA 光学系统^[3-5]由于其视场大,无遮拦、可优化变量多、像质好,已经成为目前空间遥感研究的主要由容,并逐步应用于先进航天遥感领域。

离轴 TMA 系统^[6-7]由主镜、次镜和三镜(见图 1)构成,系统的孔径光阑一般位于次镜上,主镜收集任意瞬时视场内的入射辐射并投射到次镜上,经三镜后将景物成像到焦平面上。TMA 光学系统视场是非对称的,即在一个方向上视场较

小,该方向为主镜、三镜的宽度方向,对应的尺寸较小(与次镜尺寸相当),在垂直(长度)的方向上视场较大,因此该方向上的主镜和三镜的尺寸相对较大(至少是次镜尺寸的3~5倍),此外,考虑外部限制杂光遮光罩的开口尺寸,TMA光学系统的外部开口尺寸还要增加。

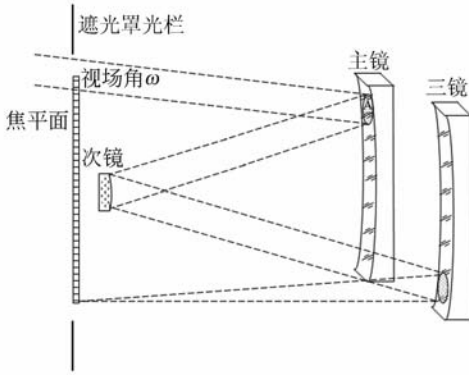


图1 离轴 TMA 光学系统成像与辐射传输示意图

Fig. 1 Imaging and radiometric transmission schematic diagram of off-axis TMA optical system

如图1所示,视场为 ω 的光束通过主镜、次镜和三镜后成像到焦平面上,在焦平面上接收到的辐射通量与主镜区域A的面积成正比,区域A的尺寸受次镜尺寸限制。而对于不同视场而言,照明光斑不会与区域A完全重叠,而是根据视场大小依次排列在主镜上,因此相机视场越宽主镜尺寸就越大,而外延的遮光罩^[8]也会随着视场角的增加尺寸加大。

如对于一个次镜直径为200 mm, $D/f=1/10$ 的宽视场离轴 TMA 系统,若主镜的长度方向上尺寸很大(约1 m),对应的外延遮光罩光阑开口尺寸将更大,会达到1 200 mm以上,由于常规1.5 m直径积分球光源开口小于离轴 TMA 光学系统遮光罩的开口尺寸,因此无法满足全孔径和全视场的辐射定标要求。

3 离轴 TMA 宽视场空间相机辐射定标

针对离轴 TMA 宽视场空间相机的特殊性,本文提出了如下两种方案对其进行实验室辐射定标。

3.1 分视场定标方案

根据离轴 TMA 空间相机辐射照明与成像的对应关系,在相机遮光罩光阑长度方向上将视场分成几段分别进行定标,每次定标(每段)可覆盖视场为:

$$\Omega = \Phi_{sh} \cdot \frac{2\omega_{TMA}}{L} = \Phi_{sh} \cdot C_{TMA}, \quad (1)$$

式中: Φ_{sh} 为积分球开口直径, $2\omega_{TMA}$ 为相机总视场, L 为遮光罩光阑在横向方向上的长度, $C = \frac{2\omega_{TMA}}{L}$ 为遮光罩光阑长度和视场的关系系数。

采用小于遮光罩光阑开口的积分球光源可以实现对相机部分视场(或像元)的绝对和相对定标。但对于分视场进行定标需要考虑以下几个问题:

(1) 一次定标覆盖的视场:开口直径为 Φ_{sh} 的积分球光源能够满足与之对应视场的辐射定标要求的基本条件是开口直径大于入瞳直径,所对应的视场范围由公式(1)计算得出。

(2) 一次定标覆盖的像元数目:在对(每个像元所对应的视场为IFOV)相机部分像元进行相对和绝对辐射定标时,一次定标像元数目为 $N = \frac{\Omega}{IFOV}$ 。

(3) 全视场需要的定标次数:如果遮光罩光阑的长度为 L ,为实现全视场的辐射定标,至少需要进行 N 次(N 取整数,只进不舍)的分段辐射定标, $N = \frac{L}{\Phi_{sh}}$ 。

此外,定标时要根据实际情况对每次定标的视场覆盖范围进行设计,以避免由积分球开口边缘处的非均匀性所引入的定标误差。

图2直观地表示了采用开口直径相对较小的积分球光源定标离轴 TMA 宽视场空间相机的照明原理。图2采用了直径为1 500 mm,开口直径为500 mm的积分球光源,将相机横向视场分为3段(3个视场),分3次实现相机全视场的辐射定标。值得注意的是每次定标的视场要小于公式(1)中的计算结果,为了稳妥起见,可适当增加分段数目以确保辐射定标采集数据的准确性。

根据该方案,对相关相机进行了辐射定标^[9]。图3所示为一个视场段覆盖了6片CCD,并获得了每个像元响应度的定标曲线,图4所示为全视场所有像元响应度的定标曲线。

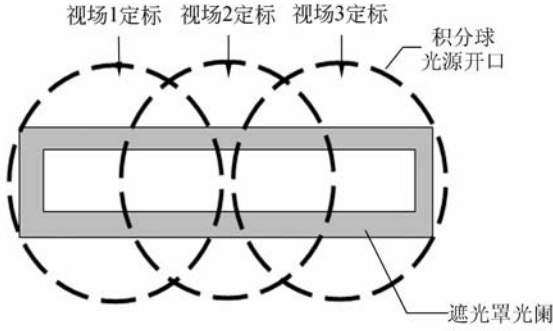


图 2 采用积分球光源分视场定标的照明原理

Fig. 2 Lighting theory of dividable visual field calibration by using integrating sphere

场较大,纵向视场很小的特点,因而本文对现有的直径为 1.6 m 的积分球光源开口进行了重新设计,将常规的圆形开口设计成长方形开口,且开口的尺寸略大于遮光罩光阑尺寸。

设计改造后的积分球为长方形开口如图 5 所示。实验表明:积分球光源开口处的余弦特性和辐射照度均匀性与积分球内照明光源的位置相关,如果仍然采用改造前圆形排布的照明灯,则长方形开口的余弦特性和辐射照度均匀性能很差,尤其在靠近开口的边缘处,最大余弦误差已达到 7%,辐射照度均匀性误差达到 10%。为此本文对积分球光源的照明灯的分布与其性能关系进行了设计和实验,结果表明:如果将照明灯分布在开口的上下方,且光源越远离长度方向开口的边界时,积分球输出的余弦特性与均匀性越好。对光源排布改造后,辐射照度非均匀性在 3% 以内,非余弦辐射误差在 2% 以内,满足了实验室辐射定

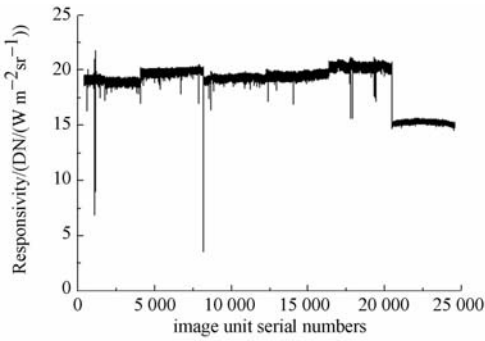


图 3 单一视场下相关像元响应度的定标曲线

Fig. 3 Calibration curve of responsivity of image unit for single visual field

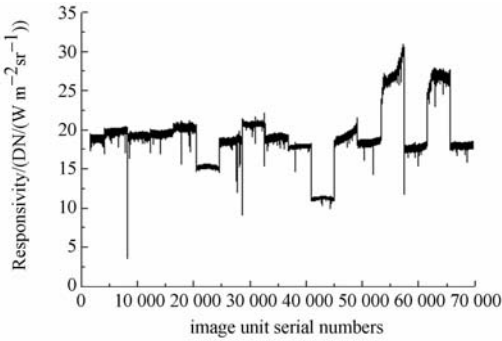


图 4 全视场所有像元响应度的定标曲线

Fig. 4 Calibration curve of responsivity of all image unit for whole visual field



图 5 长方形开口积分球实物照片

Fig. 5 Photo of special hatch integrating sphere

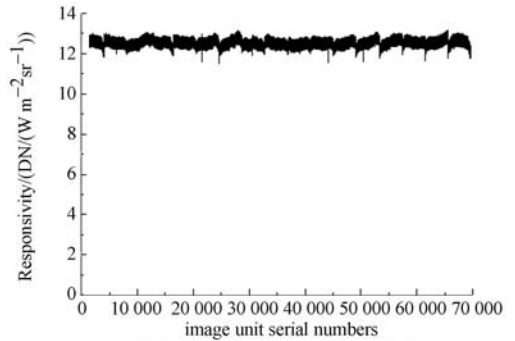


图 6 全视场所有像元响应度的定标曲线

Fig. 6 Calibration curve of responsivity of all image unit for whole visual field

3.2 利用特殊开口形状积分球的全视场定标方案

在不重新制造直径更大积分球的前提下,如果通过一次照明来实现全视场的辐射定标,需要对积分球开口进行重新设计改造,使其满足全视场、全孔径的辐射定标要求。对于离轴 TMA 宽视场空间相机,由于其光学系统具有相机横向视

标要求。利用改造后的积分球对相关相机进行了辐射定标,得到的相机全视场所有像元响应度定标曲线如图6。

定标结果表明,利用特殊开口积分球光源作为辐射定标光源,可以实现同时覆盖全视场、充满全孔径的辐射定标,能够实现对离轴 TMA 宽视场空间相机的辐射定标。

3.3 两种定标方案优缺点分析

(1) 分视场定标

该方案采用相对较小的扩展辐射定标光源实现离轴 TMA 宽视场空间相机辐射定标。其优点是整个定标利用了现有的小开口定标设备,不需要对设备进行其它改造,定标设备具有很强的通用性,故在满足辐射定标要求的同时,大大节约了成本。其缺点是定标过程较为复杂,数据处理的工作量较大,且由于定标光源开口较小不能实现一次全像元覆盖,因此会引入非均匀性定标误差,定标精度受到一定的影响。

分视场定标方案的误差主要来自积分球光源的余弦特性误差、积分球光源的非均匀性误差以及由于多次移动相机和积分球的相对位置关系而引入的误差。对直径为 1.5 m,开口为圆形,开口直径为 500 mm 的积分球光源进行了余弦特性测试,在 $-14^{\circ} \sim +14^{\circ}$ 每间隔 2° 对积分球输出的辐亮度进行测量,测量结果的相对偏差为 1.24%。同时对积分球开口处输出辐亮度的非均匀性进行测试(每个测量点的间隔为 50 mm),其相对偏差为 0.72%。由于分视场定标需要在定标过程中多次改变相机与积分球的位置关系,由此引入的误差可以由每两次分视场定标重叠区域的响应变化计算得到,其误差均方根值为 0.87%。由此可知采用分视场定标方案的定标精度为:

$$\sigma = \sqrt{0.012^2 + 0.007^2 + 0.008^2} = 1.68\%$$

(2) 利用特殊开口形状积分球的全视场定标

该方案采用长方形开口的积分球作为定标扩展光源,使之在尺寸(长宽)上满足全孔径、全视场覆盖的条件,进而实现离轴 TMA 宽视场空间相机的全像元覆盖照明辐射定标。其优点是可在定标光源和被定标相机相对位置不变的情况下实现全视场、全孔径的辐射定标,定标过程简单,数据处理过程也得到大大简化。其缺点是需要对定标光源进行改造,定标成本增加且改造后的设备为不可通用的专用设备。此外,由于积分球开口改为长方形,其横向开口尺寸较大,对积分球光源横向的均匀性和余弦辐射特性^[10]有一定的影响。

特殊开口形状积分球的全视场定标方案的误差主要来自积分球光源的余弦特性误差和非均匀性误差。对直径为 1.6 m,开口为矩形,开口尺寸为 $1\ 100\ \text{mm} \times 400\ \text{mm}$ 的积分球光源进行了余弦特性测试,在 $-14^{\circ} \sim +14^{\circ}$ 每间隔 2° 对积分球输出辐亮度进行测量,测量结果的相对偏差为 1.54%。对积分球开口处输出辐亮度的非均匀性进行测试(每个测量点的间隔为 100 mm),其相对偏差为 1.09%。由此可知,采用特殊开口形状积分球的全视场定标方案的定标精度为:

$$\sigma = \sqrt{0.015^2 + 0.010^2} = 1.89\%$$

4 结 论

考虑采用常规的辐射定标设备和运用传统的定标方法无法满足离轴 TMA 宽视场空间相机的实验室辐射定标要求,本文基于积分球光源的均匀漫射扩展特性,提出了分视场定标和利用特殊开口形状积分球的全视场定标两种方案,介绍了两种方案的定标原理,分析了两种方案的优缺点,利用提出的方案实现了对离轴 TMA 宽视场空间相机的实验室辐射定标。定标结果表明,以上两种方案切实可行,完全满足实验室辐射定标要求。

(8):1186-1190.

REN J W, WAN Z, LI X S, *et al.*. Radiation transfer characteristic and calibrating method for space optical remote sensor [J]. *Opt. Precision*

参考文献:

- [1] 任建伟,万志,李宪圣,等. 空间光学遥感器的辐射传递特性与校正方法[J]. 光学精密工程, 2007,15

- Eng., 2007,15(8):1186-1190. (in Chinese)
- [2] 刘亚侠. TDICCD 相机实验室辐射定标的研究[J]. 光电工程, 2007,34(5):71-74.
- LIU Y X. Research on the laboratory radiometric calibration of the TDICCD camera [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(5):71-74. (in Chinese)
- [3] GRAUE R, KAMPF D. Kayser-threde gmbH, et al. DIVA optical telescope [J]. *SPIE*, 2003,4854: 9-20.
- [4] RISSE S, GEBHARDT A, DAMM C, et al.. Novel TMA telescope based on ultra precise metal mirrors [J]. *SPIE*, 2008,7010(16):1-8.
- [5] 常军, 翁志成, 姜会林, 等. 长焦距空间三反光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4):315-318.
- CHANG J, WENG Z C, JIANG H L, et al.. Design of long focal length space optical system with three reflective mirrors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001,9(4):315-318.
- [6] 张雷, 贾学志. 大型离轴三反相机桁架式主支撑结构的设计与优化[J]. 光学精密工程, 2009,17(3): 603-608.
- ZHANG L, JIA X Z. Design and optimization of trussed supporting structure for off-axis three-mirror reflective space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(3):603-608.
- [7] 李志来, 薛栋林, 张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计[J]. 光学精密工程, 2008,16(12):2485-2490.
- LI Z L, XUE D L, ZHANG X J. Optical and mechanical design for long focal length and wide-field optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(12):2485-2490.
- [8] 邹刚毅, 樊学武. 离轴三反射望远镜遮光罩设计与杂光分析[J]. 光子学报, 2009,38(3): 605-609.
- ZOU G Y, FAN X W. Baffle design and stray light analysis of the off-axis three-mirror telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009,38(3):605-609.
- [9] 林德萃. 资源一号卫星 CCD 相机辐射定标和图像辐射校正[J]. 航天返回与遥感, 2000,21(2):8-13.
- LIN D L. Radiation calibration of CBERS-1 ccd camera and image radiation correction [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2000,21(2):8-13.
- [10] 章骏平, 吴浩宇, 周威, 等. 大孔径积分球辐射源光谱辐射特性测试方法研究[J]. 量子电子学报, 2001,18(5):424-428.
- ZHANG J P, WU H Y, ZHOU W, et al.. Experimental study of spectral radiance characteristics of large aperture integrating sphere [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(5): 424-428.

作者简介:



任建伟(1956—),男,吉林长春人,高级工程师,研究生导师,主要从事光谱/辐射测试设备的开发研制和光学遥感辐射校正方面的研究。E-mail: Renjw@ciomp. ac. cn



刘则洵(1980—),男,吉林人,助理研究员,硕士研究生,主要从事空间光学遥感器辐射定标方面的研究。E-mail: bjxlzx@163. com



李宪圣(1979—),男,山东德州人,助理研究员,硕士,主要从事光电仪器辐射定标的研究。E-mail: lixs688@163.com



任建岳(1952—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要研究方向为空间光学及光机电系统。E-mail: Renjy@ciomp.ac.cn



万志(1973—),男,吉林长春人,博士,副研究员,主要从事光学遥感器辐射定标方面的研究。E-mail: wz7181@163.com

●下期预告

真空应用太阳模拟灯及其灯阵的研制

任建岳¹,苏克强^{1,2},王兵¹,陈长征¹,张军¹

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春130033;

2.中国科学院研究生院,北京100039)

为了对某型号相机进行热平衡试验,并且克服传统太阳模拟器结构复杂、成本较高、光效利用率低的缺点,采用将太阳模拟灯阵整体放在真空罐内使用的研制方案。首先,对该方案所需解决的各种问题进行了理论分析,包括计算辐照度要求为 $635.2\sim 905.4\text{ W/m}^2$,光学系统效率 k 为 0.1444 ,真空罐液氮冷却系统的温度升高 ΔT 为 2.0741 K ,小于真空罐液氮冷却系统过冷度为 4 K ,并根据热平衡试验需要提出了技术要求;然后,介绍了导热结构设计、热设计的关键;最后,测试了积分器和反射镜的温度在 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,氙灯灯极温度在 $92\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,满足其长时间正常工作的条件。通过实际技术性能测试,太阳模拟灯阵的辐照度为 $490.37\sim 1\,000.56\text{ W/m}^2$ 连续可调,辐照不均匀度 $< \pm 5\%$,辐照不稳定性 $< \pm 5\%/h$ 。各项指标均满足设计技术要求。