

文章编号 1004-924X(2015)07-1867-07

测绘一号卫星相机的光谱和辐射定标

万 志*, 李葆勇, 刘则洵, 刘洪兴, 任建伟

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:对测绘一号卫星相机的各个光谱通道进行了光谱定标和辐射定标以验证其光谱辐射性能是否达到设计指标要求。进行光谱定标时,利用单色仪分光扫描波长提供准直单色辐射照明,同时同步采集定标图像数据;然后将图像灰度值与已经过校准的参考标准探测器的输出进行比对和数据处理,得到相机各个谱段的相对光谱响应函数曲线,从而进一步获得各项光谱特性参量。辐射定标时,采用近距离面源法充满相机的孔径和视场进行端对端的绝对和相对辐射定标。星上内定标则采用经老炼和筛选过的发光二极管(LED)作为星上定标光源,对焦平面阵列探测器及其成像电路的状态和辐射响应性能变化进行在轨监测,在必要的情况下予以校正。定标结果显示:测绘一号卫星相机的各项光谱和辐射性能均达到了设计指标要求,经过相对辐射校正后响应非均匀性由 1.93% 下降到 0.22%,相机全光谱段信噪比超过 90 倍,多光谱各通道信噪比优于 180 倍;发射后在轨星上内定标数据与发射前实验室测试结果的比对显示相机的辐射响应性能未发生明显变化,暂时无须校正。

关 键 词:测绘相机;光谱定标;辐射定标;星上内定标

中图分类号:V447.3;P414.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152307.1867

Spectral and radiometric calibrations for mapping satellite-1 camera

WAN Zhi*, LI Bao-yong, LIU Ze-xun, LIU Hong-xing, REN Jian-wei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of
Sciences, Changchun 130033, China)

*Corresponding author, E-mail: wz7181@163.com

Abstract: The spectral calibration and radiometric calibration were performed for every waveband of the Mapping Satellite-1 camera to validate its spectral and radiometric performance. In spectral calibration, a collimated monochromatic light source was provided by wavelength scan using a monochromator and a collimator. Meanwhile, the camera acquired calibration images, and then compared image's digital number and the output of calibrated standard reference detector to obtain relative spectral responsive curve by data analysis and processing. Furthermore, spectral characteristics were acquired. In radiometric calibration, the nearest emitting source method was used to perform the end to end relative and absolute radiometric calibrations with irradiating the whole aperture and the field of view. In the on-orbit inner calibration, the aged and picked up LEDs were employed as on-orbit inner calibration light sources to monitor the changes and status of focal plane detector array and its imaging

收稿日期:2015-03-20;修订日期:2015-04-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61108066);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20130101028jc)

electric circuit at post launch, and they were corrected in necessary conditions. Spectral calibration and radiometric calibration results indicate that all the spectral performance and radiometric performance of the Mapping Satellite-1 camera meet design requirements, non-uniformity of the camera is decreased from 1.93% to 0.22% after relative radiometric calibration. The typical Signal to Noise ratios (SNRs) of panchromatic and multispectral cameras are beyond 90 times and 180 times respectively. The compared results from the on-board inter calibration after launching and the tested data from a laboratory before launching show that radiometric responsive performance of the camera has not changed during this period, and not need to be corrected.

Key words: mapping camera; spectral calibration; radiometric calibration; on-orbit inner calibration

1 引言

2010 年 8 月国内第一部传输型三线阵立体测绘相机发射入轨以后,我国又计划分别于 2012 和 2015 年研制并发射 2 颗相同配置的相机,届时 3 台立体测绘卫星组网将可以实现对我国大部分地区地形图的立体测绘和观测。

立体测绘相机的主要任务是获取地面目标的几何方位及高程信息,其地形测绘的精度主要依赖于卫星平台的稳定性和内方位元素的几何标定精度^[1]。然而相机作为能量观测系统,其工作原理是接收来自地物目标反射的太阳辐射和大气后向散射辐射,相机获取的光辐射经过焦平面 CCD 探测器及后续电子学成像处理系统的光电转换和 A/D 变换转变为图像灰度 DN 值输出。相机输出图像的灰度包含地物目标的辐射信息,而图像灰度幅值、信噪比和对比度将直接影响到对遥感图像的分析、判读和解译^[2],所以相机工作参数的调整和光谱辐射性能的全面测试对于相机的研制和应用至关重要。

本文从三线阵立体测绘相机研制过程中的辐射定标需求、过程以及定标方法等角度介绍辐射定标在航天遥感器研制过程中所起的作用和效果,给出相机各光谱通道光谱和辐射定标主要结果,为遥感器产品成像质量的持续改进提供参考依据。

2 测绘一号卫星相机简介

2010 年 8 月 24 日,测绘一号卫星 01 星的成

功发射标志着我国传输型立体测绘卫星实现了零的突破。时隔 2 年,测绘一号卫星 02 星圆满完成历时 110 天在轨测试任务后,与 01 星一起首次实现测绘卫星的组网运行。双星影像经无缝拼接后,测绘覆盖宽度达到 110 km,极大地提高了测绘效率和几何控制能力,加快了测绘区域影像获取速度。测绘一号卫星装有 5 台相机,3 台星敏感器,2 台测量型 GPS 接收机,为中国自主研发的最复杂、功能密度最高的小卫星。其上搭载的有效载荷主要包括三线阵立体测绘相机组合体、离轴三反高分辨率相机和离轴三反多光谱相机,其中三线阵测绘相机组合体由采用同轴透射式光学系统的前、正和后视相机组成,3 个相机光轴之间的交汇角为 25°,而正视相机的焦平面两端加装了 4 个小面阵 CCD,用于对地物目标的辅助定位,以提高测绘精度。

多光谱相机包括 4 个工作谱段,即蓝谱段(0.43~0.52 μm),绿谱段(0.52~0.61 μm),红谱段(0.61~0.69 μm)以及近红外谱段(0.76~0.90 μm)。通过这些配置既能获取地面像元分辨率 5 m、幅宽 60 km 的全色立体影像,建立全球摄影测量控制网,实施控制定位,绘制 1:50 000 比例尺地形图,又能获取蓝、绿、红、近红外 4 个谱段的多光谱影像,定量反演地物的物理属性,提高地图绘制的完整性。同时,通过多光谱影像与全色影像的融合处理,可以生成彩色或假彩色正射影像产品^[3]。此外,高分辨率相机还可以获取 2 m 分辨率全色地物影像,增强对地物目标的详细、快速、准确判读能力,配合完成 1:50 000 比例尺地形图测绘和 1:25 000 比例尺地形图的修测。

3 测绘一号相机的定标需求和原理

测绘一号卫星上搭载的有效载荷数量和种类较多,各相机分系统对辐射定标的需求各不相同,根据研制任务书要求和各相机分系统的具体配置情况确定定标类型或方式主要包括相对光谱定标、实验室绝对和相对辐射定标、星上内定标以及整星数传联试状态下的现场辐射定标。其中光谱定标具体内容涉及测试并确定各相机的相对光谱响应函数曲线和光谱特性参量;实验室绝对和相对辐射定标的主要任务是测试各相机辐射响应的线性、均匀性或一致性、重复性、动态范围和信噪比^[4],调整辐射工作点以及获取用于辐射校正的定标系数等;星上内定标的研究内容包括定标光源选取、定标方案设计以及星上内定标光源的老炼、筛选和发射前辐射定标。此外,为了对比和确认各相机在装星及环境试验前后的辐射响应变化情况,卫星总体要求在发射前整星装调现场进行整星数传联试状态下的辐射定标,同时也有助于了解和掌握数传对相机辐射响应的影响。

测绘一号卫星各相机分系统的辐射定标均采用全口径、全视场和端对端的辐亮度定标方案,其原理是利用近距离扩展光源充满相机的有效通光孔径和整个焦平面探测器进行从光学系统入瞳前辐射亮度输入到最终图像灰度 DN 值输出的全链路的绝对和相对辐射定标^[5],其原理如图1所示。

相对光谱定标的工作原理是利用经过波长和辐射校准的单色准直光源照明相机焦平面探测器

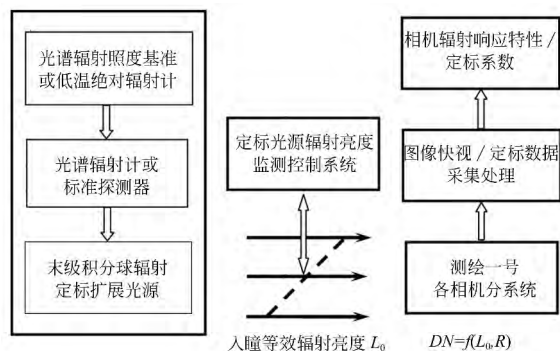


图1 测绘一号卫星相机实验室辐射定标原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of laboratory radiometric calibration for Mapping Satellite-1 camera

上部分视场,通过建立光谱辐射强度与对应波长图像灰度输出的函数响应关系获得相对光谱响应曲线,并据此计算包括中心波长、峰值波长、光谱带宽以及带外响应等光谱特性参量,实验室光谱定标装置和流程分别如图2和图3所示,相对光

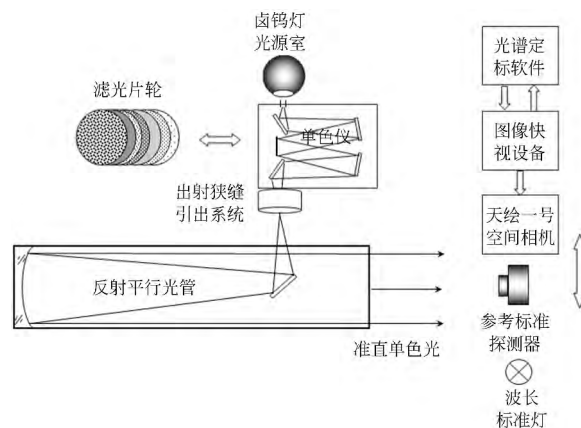


图2 测绘一号卫星相机光谱定标装置组成示意图

Fig.2 Schematic diagram of spectral calibration devices for Mapping Satellite-1 space camera

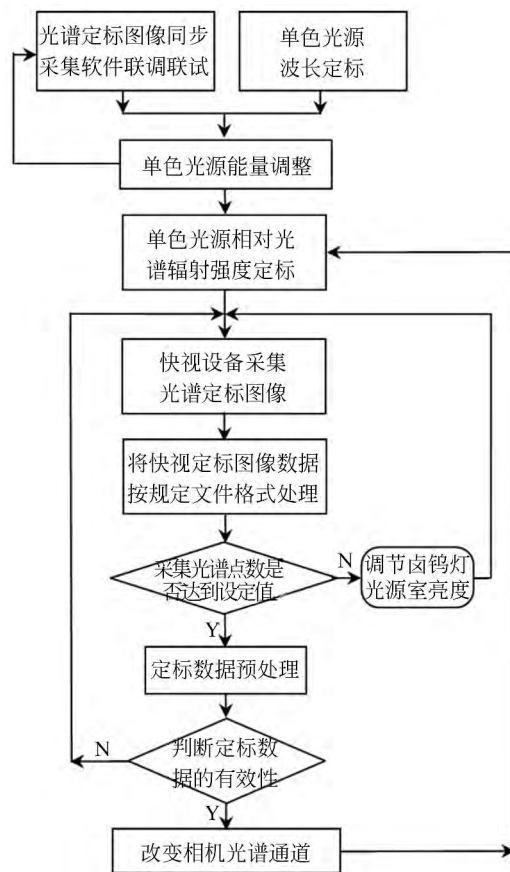


图3 光谱定标流程图

Fig.3 Flowchart of spectral calibration

谱响应函数定标结果如图 4 所示。星上内定标的作用首先是自检功能,用于监视遥感器系统成像工作状态是否发生异常情况;其次为通过遥感器内置或外部定标光源定期监视并校正由于光学系统、CCD 器件及电子学元件老化而引起的遥感器辐射响应性能变化^[6]。

4 测绘一号卫星相机的光谱/辐射定标

4.1 光谱定标

光谱定标是辐射定标的前提和输入条件,通过光谱定标可以获取各相机分系统的相对光谱响应函数曲线,和积分球光源输出的光谱辐亮度做加权平均,可以得到相机的入瞳等效辐射亮度,用此结果作为输入进行实验室绝对辐射定标时获取的定标系数将不依赖于定标光源的光谱分布^[7-8]。在测绘一号卫星相机的实验室辐射定标过程中,对全色测绘相机和多光谱相机进行了相对光谱定标。其中对全色相机进行了分元件级的光谱透过率或光谱响应测试,而后进行了光谱选择作用的乘法合成,而对于多光谱相机直接进行整机的相对光谱响应度定标,考虑到多光谱相机的带宽较宽,适当增加单色仪入射狭缝的宽度和定标光源的强度可以提高测量的信噪比。实际获取的全色和多光谱 4 个谱段的相对光谱响应曲线如图 3 所示。

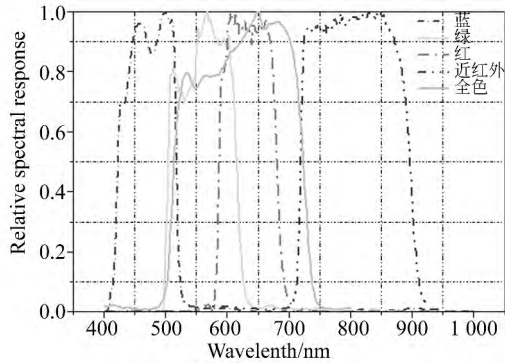


图 4 测绘一号卫星全色及多光谱相机的相对光谱响应曲线
Fig. 4 Relative spectral response curve of Mapping Satellite-1's Pan & Multispectral cameras

根据相对光谱响应曲线可以计算各波段的光谱特性参量,如表 1 所示。

表 1 相机全色和多光谱通道光谱特性参量定标结果

Tab. 1 Results of spectral calibration for pan & multi-spectral waveband (nm)

工作谱段	峰值波长	中心波长	半幅全宽	半峰值功率谱段宽度	10%峰值谱段宽度
蓝	498.0	470.5	95.0	423.0~518.0	416.0~524.0
绿	568.0	559.3	111.5	503.5~615.0	498.0~626.0
红	606.0	634.5	94.0	587.5~681.5	582.0~692.0
近红外	848.0	808.3	177.5	719.5~897.0	713.0~912.0
全色	650.0	618.3	209.5	513.5~723.0	502.0~737.0

4.2 相对和绝对辐射定标

测绘一号卫星相机的相对辐射定标主要是利用大口径积分球光源充满相机的口径和视场对各相机分系统进行了通道间一致性调整、通道内响应非均匀性测试以及获取用于相对辐射校正的定标系数。图 5 所示为三线阵前视相机的响应非均匀性测试曲线和应用定标系数作相对辐射校正后的效果。

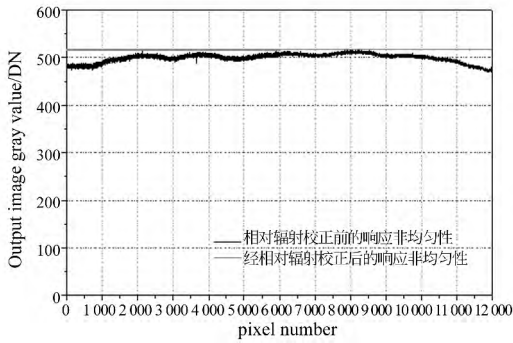


图 5 相机经相对辐射校正前后的效果对比
Fig. 5 Comparison between before and after relative radiometric calibrations

由图 5 可见,在应用定标系数进行相对辐射校正后三线阵前视相机 12 000 pixel 的图像灰度输出非均匀性由 1.93% 下降到 0.22%,可见去除条带现象效果显著。

利用相对光谱响应定标结果计算积分球定标光源各个辐亮度等级下光谱响应加权平均的入瞳等效光谱辐亮度,对测绘一号卫星各相机分系统进行了绝对辐射定标。首先通过调整默认增益和积分时间等参数确定了各相机的辐射工作点和动态范围,而后进行了绝对辐亮度响应度标定和典型照明条件下的信噪比测试,主要定标结果如表 2 所示。

表2 相机饱和辐亮度与信噪比测试结果

Tab.2 Test results of saturation radiance and SNR of the camera

工作 谱段	饱和辐亮度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$		典型信噪		
	指标 要求	定标 结果	比测试输	信噪比	实测信
			入辐亮度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	指标	噪比
蓝	19.6~20.5	20.3	8.02		273.8
绿	28.9~30.1	30.5	6.61		230.3
红	25.7~26.8	26.6	5.13	≥180	234.0
近红外	32.4~33.6	33.0	7.27		195.8
全色	39.9~41.6	41.5	12.47	≥90	147.5

从表2可见,相机各谱段的饱和辐亮度和信噪比都达到了总体指标要求。

4.3 星上内定标

鉴于测绘一号卫星搭载的相机种类和数量较多,采用一个内置卤钨灯或积分球作为星上内定标光源无法同时满足所有相机和成像通道的定标需求,综合考虑相机的结构特点以及功耗、安装位置等条件,决定分别选用高亮度白光和红外LED作为全色通道和多光谱相机近红外谱段的星上内定标光源。经过老练和筛选的LED安装在相机焦平面附近,在不遮挡成像光路的前提下利用其

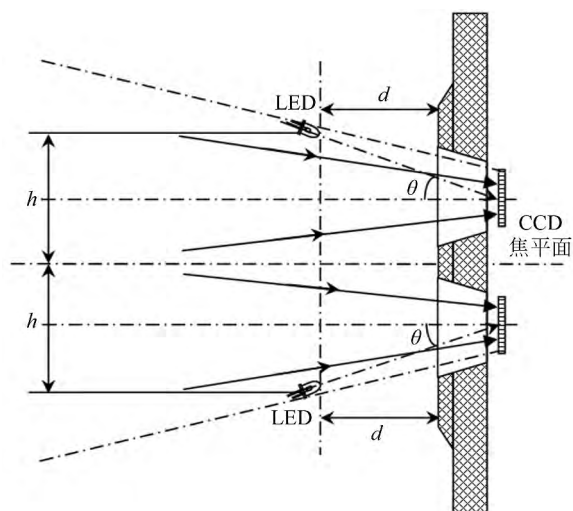


图6 星上内定标LED光源在相机焦平面处的安装位置和照明关系示意图

Fig.6 Schematic diagram of location and illumination configuration of on-orbit inner calibration light sources

发散角度大的特点覆盖照明各相机的焦平面CCD阵列探测器。LED采用恒流源控制,以保证其发光的稳定性和重复性。星上内定标LED光源在焦平面附近的安装位置关系如图6所示。

理论上LED定标光源在焦平面CCD上产生的辐射照度为:

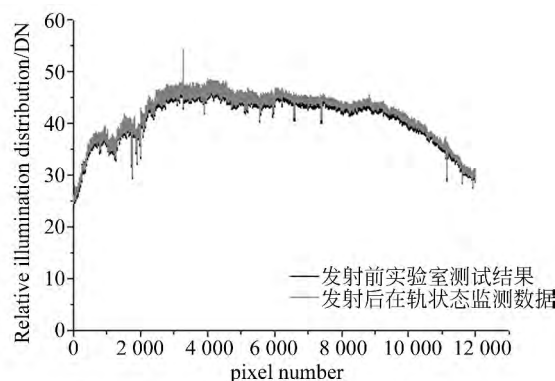
$$E = \frac{4I \cos \theta \sin^2 \theta}{h^2}, \quad (1)$$

式中: I 为LED在轴向上的辐射强度; h 为LED到达CCD光敏面法线的垂直高度; θ 为LED轴向与CCD光敏面法线间的夹角。

可见,在星上定标光源的具体设计时可根据上述照明几何关系来确定LED的数量和布局,同时还需要合理地匹配 h 、 I 和 θ 3个参数并控制好LED的驱动电流才能获得足够的信噪比和覆盖所有像元的照明光斑,对自相机光学系统以后的焦平面成像/处理单元进行辐射定标和监测^[9]。

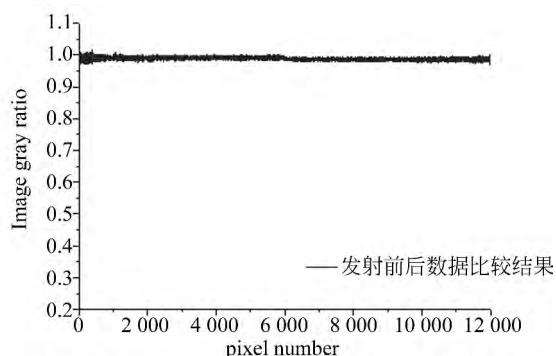
从实际应用的角度来说,相对辐射校正往往只关心成像器件之间或像元之间的相对辐射响应关系,并不需要严格地知道LED定标光源的绝对辐射照度值,所以LED发光的可靠性、环境适应性以及光场分布的稳定性尤为重要。测绘一号卫星相机所用LED光源为日亚公司的高品质工业级器件,在可靠性中心进行了严格的老练、测试和筛选,保证了重复性和可靠性,并且通过01和02星得到了验证。

图7所示为三线阵相机在发射前后星上内定标结果的比较,发射前和在轨运行状态下LED在相机焦平面上产生的辐射照度分布未发生明显变



(a) 发射前后LED在焦面产生的相对照度分布

(a) Irradiation distribution of LED inner calibration source on focal plane before and after launching



(b) 发射前后星上内定标数据比较 (在图像 DN 值之比)

(b) Comparison of inner calibration data between prelaunch and post launch (ratio of digital number)

图 7 发射前实验室条件和在轨星上内定标结果比较

Fig. 7 Comparison of inner calibration results between laboratory and on-orbit

化,各瞬时视场输出图像灰度保持一致,说明 LED 自身和焦平面 CCD 以及后续成像处理电路的状态都没有发生显著变化,短期内无需对其进行校正。

5 结 论

测绘一号系列卫星已经发射 2 颗并在轨正常

运行,在其有效载荷的研制过程中,课题组不仅对焦平面成像单元进行了定标,还在整机环境试验前后以及在整星装星现场的数传联试状态下都对系统进行了较为全面的辐射定标,调整了相机的辐射工作点和动态范围以及各成像通道的一致性,经过相对辐射定标和校正使得相机各通道响应非均匀性达到 0.5% 以内,通过绝对辐射定标获取了定标系数和饱和辐亮度、信噪比等关键指标,各项指标均能够满足总体技术要求,即全色典型信噪比不低于 90 倍、多光谱相机信噪比不低于 180 倍。发射后在轨对地成像效果证实实验室辐射定标客观上起到了改善图像质量和保证产品一致性、重复性和可靠性的作用。

本文介绍了测绘一号卫星相机的实验室辐射定标原理、内容和主要结果,可对测绘系列遥感卫星图像产品的辐射校正以及后续遥感器产品的研制过程与质量控制的持续改进提供参考。定标试验是在实验室常温常压条件下进行的,与在轨空间环境状态下的辐射响应可能存在一定差异。为了获得更高的定标精度,下一步会在真空环境模拟状态下进行定标^[10]。另外,应用新型光谱分布可调谐定标光源将有望进一步提高绝对辐射定标精度^[11]。

参考文献:

- [1] 胡君,王栋,孙天宇. 现代航天光学成像遥感器的应用与发展[J]. 中国光学,2010,3(6):519-533.
HU J, WANG D, SUN T Y. Application and development of recent space optical imaging remote sensors [J]. Chinese Optics, 2010, 3(6): 519-533. (in Chinese)
- [2] 顾行发,田国良,余涛,等. 航天光学遥感器辐射定标原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2013.
GU X F, TIAN G L, YU T, et al.. The radiometric calibration principle and method of space remote sensor [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [3] 何忠焕,左志进,刘冬枝. 天绘一号卫星遥感影像的处理方法[J]. 地理空间信息, 2012, 10(6):4-6.
HE ZH H, ZUO ZH J, LIU D ZH. Processing method of mapping satellite-1 image [J]. Geospatial Information, 2012, 10(6): 4-6. (in Chinese)
- [4] 赵晓熠,张伟,谢蓓芬. 绝对辐射定标与相对辐射定标的关系研究[J]. 红外,2010,31(9):23-29.
ZHAO X Y, ZHANG W, XIE X F. Study of relationship between absolute calibration and relative calibration[J]. Infrared, 2010, 31(9): 23-29. (in Chinese)
- [5] 任建伟,刘则洵,万志,等. 离轴三反宽视场空间相机的辐射定标[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(7): 1491-1497.
REN J W, LIU Z X, WAN ZH, et al.. Radiometric calibration of off-axis three-mirror-anastigmatic space camera with wide viewing field [J]. Opt. Precision Eng., 2010, 18(7): 1491-1497. (in Chinese)
- [6] 陈福春,陈桂林,王淦泉. 卫星遥感仪器的可见光星上定标[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(Suppl.): 34-

38.
CHEN F CH, CHEN G L, WANG G Q. On-orbit visible calibration for satellite remote sensing instrument [J]. *Advances in Marine Science*, 2004, 22 (Suppl.):34-38. (in Chinese)
- [7] 万志,李葆勇,李宪圣,等. 积分球光源分布温度对宽波段遥感器绝对辐射定标的影响及其校正研究[J]. *发光学报*, 2012, 33(8): 863-868.
WAN ZH, LI B Y, LI X SH, *et al.*. Influence of integrating sphere source's distribution temperature on broadband optical remote sensor's absolute radiometric calibration and correcting methods [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33(8): 863-868. (in Chinese)
- [8] 陈风,郑小兵. 光谱非匹配对光学遥感器定标精度的影响[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(3): 415-419.
CHEN F, ZHENG X B. Influence of spectrum non-matching on calibration precision of remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 415-419. (in Chinese)
- [9] 任建伟,李宪圣,刘洪兴,等. 宽视场空间光学相机星上相对辐射定标系统[J]. *光电工程*, 2014, 41(9): 1-11.
REN J W, LI X SH, LIU H X, *et al.*. The space-borne relative radiation calibration system of large field space optical camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(9): 1-11. (in Chinese)
- [10] 刘瑞芳,景加荣,陈丽,等. 卫星光学载荷真空定标技术研究进展[J]. *大气与环境光学学报*, 2014, 9(2): 90-96.
LIU R F, JING J R, CHEN L, *et al.*. Research progress of vacuum calibration technology of satellite optical Load [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(2): 90-96. (in Chinese)
- [11] 刘洪兴,刘则洵,李葆勇,等. 基于多光源的光谱分布可调谐光源系统[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(9): 2345-2351.
LIU H X, LIU Z X, LI B Y, *et al.*. Spectrum-tunable light source based on multi-sources [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2345-2351. (in Chinese)

作者简介:



万志(1973—),男,吉林长春人,博士,副研究员,2008年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事光学遥感器实验室光谱辐射定标和性能评价方面的研究。E-mail: wz7181@163.com



李葆勇(1975—),男,吉林长春人,副研究员,主要从事光电仪器辐射校正方面的研究。E-mail: lby75@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)