

文章编号 1004-924X(2015)07-1852-07

## 空间相机在轨成像模式的建立

李宪圣<sup>1,2\*</sup>, 任建岳<sup>2</sup>, 任建伟<sup>2</sup>, 张星祥<sup>2</sup>, 薛常喜<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;  
2. 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:**提出空间相机在轨成像模式的概念,研究了建立空间相机成像模式的方法。首先,根据太阳高角和地物反射率,使用 MODTRAN 软件计算相机入瞳前的辐射亮度,分析相机的辐射定标数据,包括每种成像模式的响应度、辐射亮度范围,积分时间关系等。然后,分析相机测摆成像与平飞成像时的积分时间关系,获得相机在各侧摆角下,每种成像模式的辐射亮度范围。最后,依据成像模式的辐射亮度范围和各太阳高角下景物的辐射亮度范围,建立了太阳高角和相机侧摆角组合下的成像模式表。空间相机成像时,依据成像模式表查找对应的成像模式,即可按该模式成像。该方法已多次应用于遥感相机成像实验中,获得了较好的成像效果,图像质量的满意度由 65% 提高到 99.9%。结果表明:依据该方法建立的空间相机成像模式,获得图像效果较好,图像既包含全部景物信息又具有丰富的图像层次。

**关键词:**空间相机;辐射定标;成像模式

**中图分类号:**V447.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152307.1852

## Establishment of image model for on-board space camera

LI Xian-sheng<sup>1,2\*</sup>, REN Jian-yue<sup>2</sup>, REN Jian-wei<sup>2</sup>, Zhang Xing-xiang<sup>2</sup>, XUE Chang-xi<sup>1</sup>

(1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;  
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)  
\* Corresponding author, E-mail: lixs688@163.com

**Abstract:** The concept of on-board imaging model for a space camera was proposed, and the method to establish the imaging model of the space camera was researched. On the basis of the solar elevation angle and the reflection of earth surface, the radiance at the entrance pupil of space camera was calculated using the MODTRAN software. Then the radiometric calibration data were analyzed and the responsibility, radiance range and the integration time for each image model were acquired. Meanwhile, the relation between the responsibility and the integration time was obtained for scroll image and standard image and the radiance ranges at each image model was calculated at every scroll angle. Finally, according to the radiance range at each image model and the maximum objective at sensor radiance from the earth surface, an imaging model table was established under the scroll angle and solar

收稿日期:2015-02-15;修订日期:2015-03-10.

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)

elevation angle. When the space camera worked on board, one could choose a corresponding imaging model by looking up the table and could achieve better images. The method has been used in space camera imaging for several times, high quality remote images have been acquired. The image satisfaction improves from 65% to 99.9%. According to the method, the remote image's quality has been improved obviously. The image not only includes all scene information, but also has abundant levels.

**Key words:** space camera; radiometric calibration; image model

## 1 引言

随着科技的发展,空间相机迅速发展,QuickBird、WorldView-2、GeoEye-2等近代商业卫星<sup>[1]</sup>的地面像元分辨力已优于1 m,最高达0.41 m,其均采用TDICCD作为成像器件,卫星在轨推扫成像。由于地面的景物特征复杂,空间相机下一时刻的成像景物未知,如果按前一刻获得图像信息调整相机的增益等参数,可能造成下一时刻获得图像偏亮或偏暗。目前,上述相机还很难实现在轨自动调整增益、自动调整积分级数,它主要通过数传指令来控制相机的成像参数。

近几年出现的视频卫星<sup>[2]</sup>和微小卫星<sup>[3]</sup>的地面像元分辨力优于1 m,采用面阵CCD或高性能的CMOS成像,可以依据获得的图像信息,调整探测器的增益,快门速度等。全自动模式为该类相机摄像默认工作模式,意味着摄像机可自动调整增益、白平衡和快门速度,也可以通过星载计算机响应地面指令,手动设置上述参数。

国内卫星大多采用TDICCD作为感光元件,利用卫星飞行实现推扫成像。由于地面的景物特征比较复杂,景物到达相机入瞳处的辐射亮度受大气透过率、太阳高角、大气散射等多因素的影响。为了获得高质量的图像,需要为空间相机建立在轨成像模式。Kiran Murthy<sup>[3]</sup>仅做了简单的叙述,并未给出具体的成像模式。武星星等<sup>[4]</sup>给出了基于光照条件空间相机自动增益调整方法,但未给出空间相机侧摆,积分级数等之间的关系。目前空间相机为实现大视场和宽覆盖,焦平面多采用多片CCD拼接而成<sup>[5-8]</sup>,在成像过程中涉及到的地物种类繁多。因此,需要全面考虑相机成像过程中的诸多因素,为空间相机建立合理的成像模式,以获得更高质量的图像。

实验室辐射定标是空间相机(空间光学遥感器)研制过程中的重要步骤之一,其主要作用是,

(a)建立空间相机的绝对辐射响应函数;(b)确定空间相机工作动态范围、信噪比、饱和辐亮度、等效噪声辐亮度、响应线性度、响应非均匀性;(c)获得像元之间的相对辐射定标数据,对空间相机图像做辐射校正。

辐射定标数据的另一个重要应用为根据建立空间相机在轨成像模式,在空间相机对地物成像时,选取合适的相机工作参数,获得高质量的图像。优良的光学子系统、电子学子系统、热控子系统等,为空间相机获得高的动态传递函数和高信噪比提供了硬件保障条件,但是相机入瞳前的辐射亮度与成像时的太阳高角、地物反射率、大气透过率、大气散射等相关。如果相机工作参数选择不当,会出现图像偏亮(过度曝光),或者偏暗(曝光不足),造成图像质量不佳。

本文针对空间相机如何设置其成像工作参数才能获得最佳成像质量的问题展开研究,依据空间相机的成像链路和辐射定标数据,研究了空间相机在轨成像模式建立方法。

## 2 空间相机在轨成像模式建立方法

### 2.1 空间相机的成像链路

可见光空间相机的成像链路如图1所示,太阳光经过大气层,部分光被大气散射、部分光被大气吸收,大部分光到达地面,被地物反射后经过大气层到达相机的入瞳:

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{E_{\lambda} \rho_{\lambda}}{\pi} \tau_{\lambda} d\lambda + L_{\text{SCAT}}, \quad (1)$$

式中: $L$ 为相机入瞳前的辐射亮度; $E_{\lambda}$ 为太阳光以及天空背景光到达地面的光谱辐射照度; $\rho_{\lambda}$ 为地面景物的光谱反射率; $\tau_{\lambda}$ 为大气的光谱透过率; $L_{\text{SCAT}}$ 为大气散射到达相机的辐射亮度; $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 为空间相机的光谱响应起止波长。

$E_{\lambda}$ 随着太阳高角的变化而变化, $\rho_{\lambda}$ 与地物的种类相关,每种地物都有自己的光谱反射率,由于

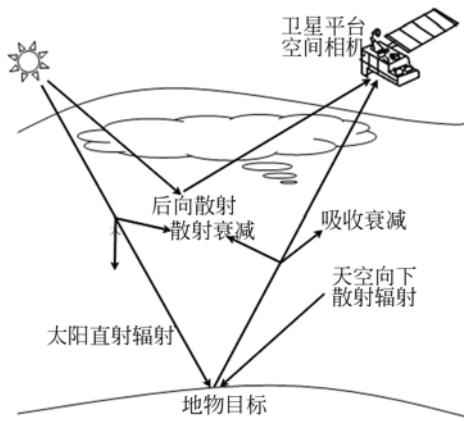


图 1 空间相机成像链路图

Fig. 1 Radiance path from earth to space camera

地物的种类较多,  $\rho_s$  也千变万化, 如图 2 所示。大气透过率  $\tau_a$  与成像时刻的天气状况相关, 因而在成像时刻, 相机入瞳处的辐射亮度受多个因素影响。可以通过现有的大气传输软件的典型大气模型进行估算。

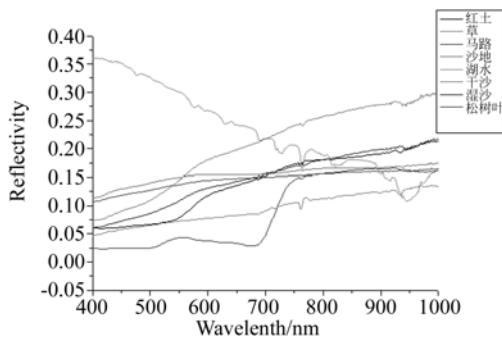


图 2 几种地物的反射率

Fig. 2 Spectral reflectivity of some earth scene

### 2.2 入瞳前辐射亮度范围估算

使用 MODTRAN 软件估算景物到相机入瞳前的辐射亮度。计算条件: 波段为  $0.5 \sim 0.9 \mu\text{m}$ ; 中纬度夏季第 172 天, 无云无雨, 乡村气溶胶, 气象视距为 23 km, 轨道高度大于 100 km, 地面海拔 100 m,  $180^\circ$  垂直观测, 地球温度 300 K。

计算数据如图 3 所示, 地物反射率为 0.2, 相机入瞳前的辐射亮度随太阳高角的增加缓慢变化, 当太阳高角大于  $50^\circ$  时, 辐射亮度增加的幅度明显变缓。

由图 4 可以看出, 在同一太阳高角下, 相机入瞳前的辐射亮度与地物的反射率呈线性增加。主要原因是在使用软件计算的过程中, 输入的地物

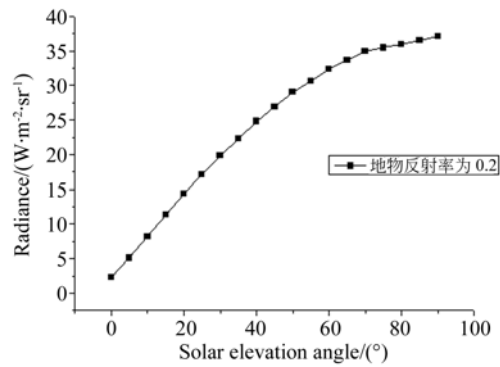


图 3 反射率为 0.2 的地物在各太阳高角下的辐射亮度  
Fig. 3 Relationship between radiance and solar elevation angle with surface reflectivity equaling to 0.2

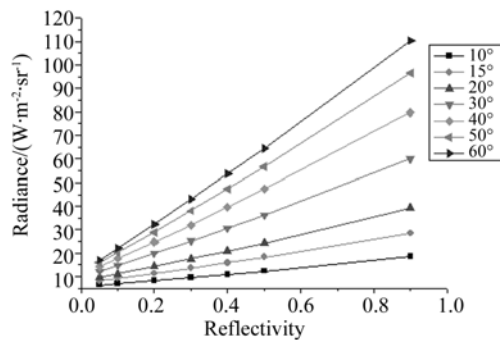


图 4 不同太阳高角下的辐射亮度

Fig. 4 Relationship between radiance and surface reflectivity with different solar elevation angle

反射率是在波段范围内的平均值反射率。

### 2.3 辐射定标过程

相机的输出与辐射量中的辐射亮度相关。因此, 实验室绝对辐射定标<sup>[9-10]</sup>须采用全孔径、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。

一般采用积分球均匀扩展光源对空间相机进行实验室辐射定标, 积分球光源的出光口大于相机的入光口, 可充满相机的视场, 较好地满足辐射定标要求。整机辐射定标示意如图 5 所示。

空间相机研制完成后, 在发射前进行实验室辐射定标, 空间相机的实验室主要辐射定标内容为: 相机在各参数(积分级数、增益)组合下的响应度; 积分时间关系, 以及相机信噪比和辐射动态范围等。

在辐射定标前, 使用国家标准辐射亮度计, 将

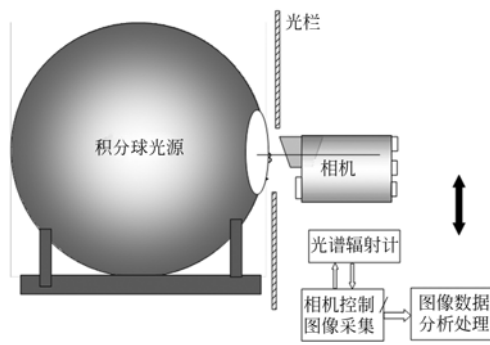


图 5 整机辐射定标示意图  
Fig. 5 Scheme of radiometric calibration

国家标准光谱辐射亮度传递到积分球光源的辐射亮度计上,积分球光源的辐射亮度计实时测试积分球光源输出的光谱辐射亮度。在对空间相机进行辐射定标时,调整积分球光源输出的辐射亮度,并采集该亮度下的均匀图像,计算每个像元的在格辐射亮度下的平均灰度值,得到  $n$  个辐射亮度和  $n$  个对应的灰度值,使用最小二乘拟合,获得每个像元的响应度。即建立相机入瞳前的辐射亮度与图像灰度值之间的辐射响应函数。

积分球光源的主要技术指标为:不稳定性  $\sigma_w : < 0.5\% / h$ ; 非均匀性  $\sigma_U : < 2.0\%$ ; 余弦特性  $\sigma_c : < 2.0\%$ ;

经过辐射定标,获得相机输出的图像灰度值与输入辐射亮度之间的辐射响应关系如图 6 所示。可以获得相机两个参数(积分级数与增益)组合下的辐射响应函数,以及对应的辐射亮度范围。

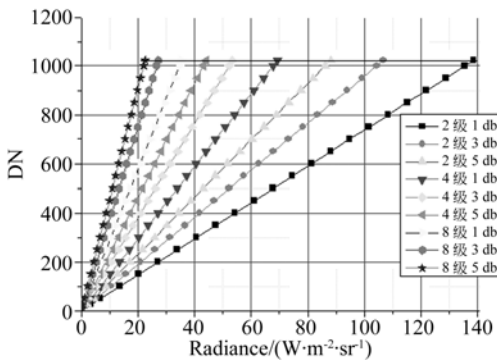


图 6 响应曲线  
Fig. 6 Relationship between DN and radiance with image model

积分时间关系的定标:保持相机入瞳辐射亮度为  $15.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ , 获取不同积分时间下

的图像,定标结果如图 7 所示,表明图像输出灰度值与积分时间呈线性关系。

### 2.4 成像模式建立方法

为了及时观察某个区域的变化,如某地发生了地震、森林火灾等自然灾害。若在空间相机垂直地面成像的幅宽内,难以观察到该区域,此时可通过卫星带动相机侧摆一个角度,完成对该区域的成像。相机侧摆时,需要及时调整相机成像的积分时间,以便及时完成像移补偿。由于卫星按一定的轨道倾角在轨运行,而地球为一个大椭圆球体,当卫星左右侧摆相同的角度时,引起相机视轴线到达地球表面的距离不同,造成积分时间不同。积分时间与侧摆角的关系如图 8 所示。当侧摆角由  $0 \sim 25^\circ$  时,相机的积分时间由  $0.84 \text{ ms}$  增加至  $1.18 \text{ ms}$ ,增加了 1.4 倍。

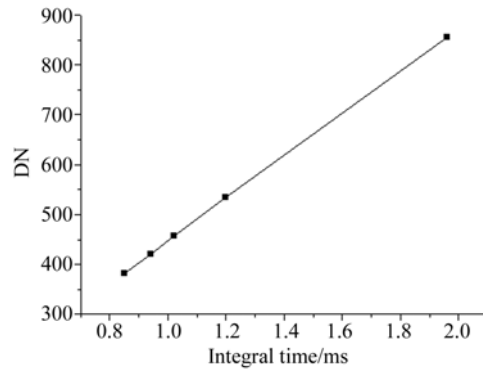


图 7 图像灰度值与积分时间关系曲线  
Fig. 7 Relation between DN and integral time

空间相机在轨成像模式是利用软件计算地物到相机入瞳前的辐射亮度(见图 4)和空间相机的实验室辐射定标结果(见图 6 和图 7),建立太阳高角、相机侧摆角和相机工作参数之间的关系。当空间相机执行摄像任务时,使用 STK6.0 软件计算出成像时刻成像区域的太阳高角和相机侧摆角,依据两项参数设置相机的工作参数(积分级数和增益),使相机工作在适合的工作参数下,以便获得较好的图像效果。

由相机输出图像灰度值 DN 与辐射亮度  $L$  呈线性关系:

$$DN = R * L * T_G, \quad (2)$$

式中:  $R$  为在基准积分时间下的响应度,  $T_G$  为成像时刻的积分时间与基准积分时间的比值,即对应侧摆角的积分时间与无侧摆时积分时间的比值。

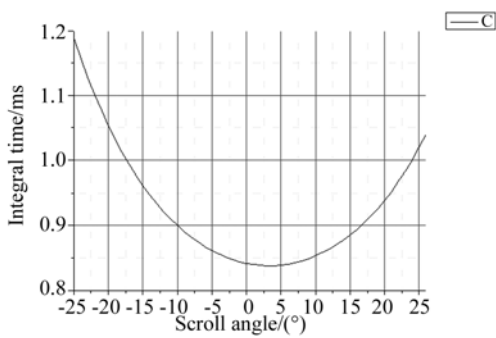


图 8 相机侧摆角与积分时间的关系

Fig. 8 Relation of integral time with scroll angle

相机的饱和 DN 值是由相机的量化位数决定的,如采用 10 bit 量化,则饱和 DN 值为 1 023。由此可以求得对应相机工作参数的饱和辐射亮度:

$$L_{\text{SAT}} = \frac{DN}{R \times T_G} = \frac{1\ 023}{R \times T_G} \quad (3)$$

获得饱和辐射亮度后,查找图 4 中各太阳高角下的最大辐射亮度,建立成像模式表。

根据相机的工作参数定义了相机的成像模式(A、B……K),如表 1 所示。按积分时间增加 0.1

表 1 相机成像模式及其饱和辐射亮度

Tab. 1 Image model and saturation radiance at some scroll angles

成像模式	相机工作参数	侧摆角/(°)						
		-25	-22	-18	-15	0	19	25
A	2 级 1 dB	98.2	105.7	115.4	125.9	138.5	125.9	115.4
B	2 级 3 dB	75.7	81.5	89.0	97.1	106.8	97.1	89.0
C	2 级 5 dB	62.5	67.3	73.5	80.1	88.2	80.1	73.5
D	4 级 1 dB	49.1	52.9	57.7	63.0	69.3	63.0	57.7
E	4 级 3 dB	37.9	40.8	44.5	48.5	53.4	48.5	44.5
F	4 级 5 dB	31.3	33.6	36.7	40.1	44.1	40.1	36.7
G	8 级 1 dB	25.1	27.0	29.5	32.2	35.4	32.2	29.5
H	8 级 3 dB	19.3	20.7	22.6	24.7	27.2	24.7	22.6
K	8 级 5 dB	16.0	17.2	18.8	20.5	22.5	20.5	18.8

倍,规划了侧摆角,并将其作为侧摆角区间的中心角度。利用式(3)计算出各模式下在对应的侧摆角下的饱和辐射亮度。

图 4 所示为使用 MODTRAN 大气传输软件

计算的在各太阳高角下的相机入瞳前的辐射亮度,表 1 中对应侧摆角的辐射亮度略大于对应太阳高角的最大辐射亮度,作为其成像模式。

依据上述方法建立的成像模式如表 2 所示。

表 2 成像模式

Tab. 2 Image model

太阳高角/(°)	侧摆角/(°)						
	-27~-24	-24~-20	-20~-15	-15~-10	-10~18	18~24	24~27
$\leq 10$	H	H	K	K	K	K	K
$10 < H \leq 15$	F	G	G	G	H	G	G
$15 < H \leq 20$	E	E	F	F	F	F	E
$20 < H \leq 30$	C	C	D	D	D	D	C
$30 < H \leq 40$	B	B	B	C	C	C	B
$40 < H \leq 50$	A	A	A	B	B	B	B
$50 < H \leq 60$	—	—	—	A	A	A	—

### 3 试验与结果

使用该方法应用于某遥感卫星,获得了较好

的成像效果。分别采用 3 种模式对同一区域成像,获得图像如图 9~11 所示。图 9 所示的图像显示模式 A 的饱和辐射亮度远大于所拍摄景物的最大辐射亮度,造成图像灰度值偏低,最大灰度

值为饱和的 25%, 图像景物之间的差别小, 对微小变化并不敏感, 图像的层次不丰富。图 10 为选取模式 F 获得的图像, 其饱和辐射亮度低于景物的最大辐射亮度, 使得部分景物图像灰度值饱和, 图像的信息丢失。图 11 所示的图像为模式 D 获得的图像, 其饱和辐射亮度略大于景物的最大辐射亮度, 图像在获得全部景物信息的同时保证了图像的丰富层次信息。



图 9 模式 A 获得图像  
Fig. 9 Image by image model A



图 10 模式 F 获得图像  
Fig. 10 Image by image model F

21 位判图人员分别对未使用成像模式的 51 幅图像和使用成像模式的 51 幅图像进行了主观

判读, 按“优、中、差”3 个级别进行了评价, 结果表明: 未使用成像模式的 51 幅图像中“优”占 65.0%, 使用成像模式的 51 幅图像中“优”占 99.9%, 图像效果的满意度明显提高。同时, 如果空间相机使用 96 级积分级数和 5 dB 的增益成像, 可以在  $-3^\circ$  太阳高角下获得较好的图像, 与  $10^\circ$  太阳高角相比, 每天的成像时间增加 3 h。



图 11 模式 D 获得图像  
Fig. 11 Image by image model D

## 4 结 论

设计了空间相机使用成像模式。依据成像时的太阳高角和相机的侧摆角, 设置相机的工作参数, 使得空间相机具有了人眼的“瞳孔”的作用, 在空间相机中应用取得了良好的成像效果, 效果的满意度达到 99.9%。使用高积分级数和高增益成像, 空间相机可以在  $-3^\circ$  太阳高角下获得较好的图像, 与  $10^\circ$  太阳高角的成像能力相比, 每天的成像时间增加 3 h。随着技术的发展, 对空间相机在轨成像算法进一步优化, 空间相机可以在轨自动设置相机工作参数, 以获得较好的成像质量。

## 参考文献:

- [1] 韩昌元. 近代高分辨率成像卫星[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(3): 201-208.  
HAN CH Y. Recent earth imaging commercial satellites with high resolutions[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*. 2010, 3(3): 201-208. (in Chinese)
- [2] 刘韬. 国外视频卫星发展研究[J]. 国际太空, 2014, 429: 50-56.  
LIU T. Development of video satellite [J]. *Space international*, 2014, 429: 50-56. (in Chinese)

- [3] Kiran Murthy, Michael Shearn, *et al.*. SkySat-1: Veary High-Rasolution Imagery from a Small Satellite[J]. *Proc. of SPIE*, 2014.
- [4] 武星星, 刘金国, 周怀德, 等. 基于光照条件的空间相机增益在轨自动调整[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 032800-1-7.  
WU X X, LIU J G, ZHOU H D, *et al.*. Automatic on-orbit adjusting gains of space camera based on lighting conditions[J]. *Acta opticas Sinica*, 2014, 34(3):032800-1-7. (in Chinese)
- [5] 孙斌, 李景林, 张星祥, 等. 600 mm 长焦平面时间延迟积分 CCD 的交错拼接[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(11):2908-2913.  
SUN B, LI J L, ZHANG X X, *et al.*. Interleaving assembly of TDICCDs on 600mm focal plane[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2908-2913. (in Chinese)
- [6] 郭疆, 龚大鹏, 朱磊, 等. 测绘相机焦平面 CCD 交错拼接中重叠像素数计算. *光学精密工程*, 2013, 21(5):1251-1257.  
GUO J, GONG D P, ZHU L *et al.*. Calculation of overlapping pixels in interleaving assembly of CCD focal plane of mapping camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5):1251-1257. (in Chinese)
- [7] 李晓杰, 任建伟, 李宪圣, 等. 反射式拼接 CCD 相机非均匀性定标与校正[J]. *液晶与显示*, 2014, 29(6):1057-1064.  
LI X J, REN J W, LI X SH, *et al.*. Non-uniformity calibration and correction of reflector based mosaic CCD camera [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*. 2014, 29(6):1057-1064. (in Chinese)
- [8] 李宪圣, 万志, 刘则洵, 等. 大视场空间相机 CCD 性能测试及筛选方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(7):2245-2250.  
LI X SH, WAN ZH, LIU Z X, *et al.*. The method of CCD test and screening for space camera with wide field of view[J]. *Infrared and Laser Engineering*. 2014, 43(7):2245-2250. (in Chinese)
- [9] 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-anastigmat space camera with wide viewing field[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7):1491-1497. (in Chinese)
- [10] 郭悦, 刘晓鹏, 杨桦. 空间 CCD 相机的定标方法研究[J]. *光学技术*, 2007, 33: 237-238.  
GUO Y, LIU X P, YANG H. Analysis of calibration for space CCD camera[J]. *Optics Technique*, 2007, 33: 237-238. (in Chinese)

#### 作者简介:



李宪圣(1979—),男,山东德州人,博士,副研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2006年于中科院长春光机所获得硕士学位,主要从事空间光学遥感器辐射定标研究和光电测试系统研究。E-mail: lixs688@163.com



任建岳(1952—),男,吉林长春人,本科,研究员,主要研究方向为光学遥感器的研制和性能评价。E-mail: aq0183@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)