

用于宽视场空间相机的 CCD 光谱特性筛选装置

叶 钊^{1,2*}, 刘则洵^{1,2}, 李宪圣¹, 万 志¹, 任建伟¹, 刘洪兴^{1,2}

(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. 中国科学院大学 研究生院, 北京 100039)

摘要:结合 CCD 辐射响应函数, 提出了基于相对光谱响应和光谱参量的 CCD 筛选方法, 研制了 CCD 光谱特性筛选装置。装置集成化程度高, 可以快速便捷的测试 CCD 的相对光谱响应、峰值波长、中心波长和半峰值带宽 (*FWHM*) 等光谱参量, 并依据测试数据建立数据库进行最优筛选。对某批次 10 只时间延迟积分 (TDI, time delay integration) (TDICCD) CCD 进行筛选试验, 对实验数据分析得到了一组 4 只最优的 TDICCD 组合。整个系统的测量不确定度优于 3.5%。

关键词:CCD; 筛选; 辐射响应函数; 相对光谱响应; 光谱参量

中图分类号: TN215 文献标识码: A 文章编号: 1005-0086(2013)02-0265-06

Screening device of CCD spectral conformance for wide field of view space camera

YE Zhao^{1,2*}, LIU Ze-xun^{1,2}, LI Xian-sheng¹, WAN Zhi¹, REN Jian-wei¹, LIU Hong-xing^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Focal plane array assembled by one CCD has been used for wide field of view space camera. For several assembled CCDs of focal plane array, each CCD should have higher spectral coherence, because relatively large errors can influence the focal surface spectral characteristics, causing the target spectral information loss and affecting earth observation. Combining with CCD radiate response function, we propose a screening experiment scheme based on relative spectral response and spectral parameter, and then fabricate a screening device for them. It ensures spectral coherence for the assembled CCDs of focal plane array very well. The facility is highly integrated. It can test the relative spectral response, peak wavelength, center wavelength, full width at half maximum (*FWHM*) and other spectral parameters quickly and easily. We establish a database in accordance with the test data, and carry out the optimal screening. Using this device, we test 10 time delay and integration charge coupled devices (TDICCDs) in a batch. According to the analysis and calculation of the experimental data, the results show an optimal combination of four TDICCDs. The measurement uncertainty of the facility is less than 3.5%. The TDICCD selected by this device has been used in focal plane array assembly wide field of view space camera. It provides a favorable technical support for the camera image quality.

Key words: CCD; screening; radiant response function; relative spectral response; spectral parameter

1 引言

目前的宽视场空间光学传感器多使用时间延迟积分 CCD (TDICCD) 拼接的焦面阵列, 为了满足宽覆盖和高分辨力的成像效果, TDICCD 的拼

接必须具备足够的精度。同时在拼接之前, 还必须对 TDICCD 进行测试, 挑选出几何特性、辐射参量和光谱参量相近的芯片。其中, 光谱参量决定了指定波段内测量目标的辐射信息。准确的光谱

* E-mail: sunyeath@gmail.com

收稿日期: 2012-07-09 修订日期: 2012-08-27

基金项目: 国家“863”高技术计划 (863-2-5-1-13B) 资助项目

信息结合数值算法模型,可以得到目标的物理参数和空间分布^[1]。

近年的对地观测实践中,针对大气、海洋、陆地和植被等目标的观测都对光谱参量的准确性提出了很高的要求,其数据的准确程度将在很大程度上影响天气预报、气候研究、环境监测和军事目标侦查探测、监视等领域的应用效果^[2]。

多片拼接的 CCD 焦面阵列,各 CCD 光谱参量应该尽可能的保持一致,若偏差较大会影响整个焦面阵列的光谱特性,引起观测目标光谱信息丢失,影响对地观测^[3~6]。目前国内关于 CCD 光谱筛选的工作尚未见到相关报道。本文提出测量单片 CCD 相对光谱响应^[7]并从大量 CCD 中筛选出光谱一致性接近的待拼接 CCD 的筛选方法,设计了 CCD 光谱特性筛选装置,能够迅速有效地从大量 CCD 中筛选出光谱特性相近的 CCD 用于宽视场 CCD 相机的焦面拼接。并使用筛选装置对 10 只 TDICCD 进行了筛选测试。

2 CCD 光谱筛选的依据及要素

CCD 的生产和镀膜工艺都会造成 CCD 光谱性能的差异。将不同的 CCD 拼接在一起,由于 CCD 个体之间、每个 CCD 后续处理电路以及光学系统在不同 CCD 上形成照度等的差异,拼接后 CCD 之间的光谱响应存在较大不同,最终影响拼接图像的光谱质量。陈风等^[8]研究了光谱非匹配对光学遥感器定标精度的影响,其中对中低光谱分辨或全色光学遥感器,在带宽为 300 nm 时光谱非匹配造成测量相对误差可达 7.9%。该研究成果同样适用于存在光谱差异的 CCD 拼接后整个焦面的光谱不匹配,图 1 是同一批次相同型号的两只 TDICCD 归一化相对光谱响应度及拼接后整个焦面的平均归一化相对光谱响应度。

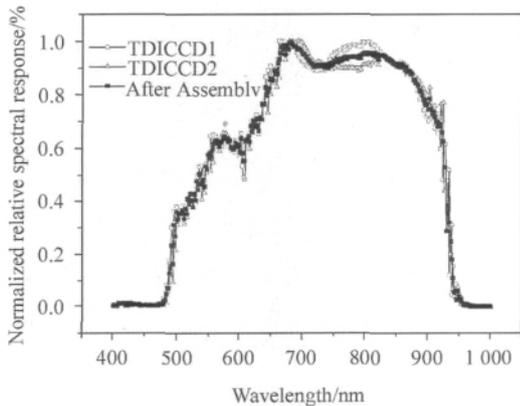


图 1 TDICCD 拼接前后光谱差异

Fig. 1 Spectral responses before and after TDICCD assembly

CCD 光敏面上接收的光辐照度 E 与其每个像元输出数码值 DN 的关系为

$$DN = T_{int} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \cdot E(\lambda) d\lambda \tag{1}$$

$$DN = DN_0 + R_1 \cdot E + R_2 \cdot E^2 + R_3 \cdot E^3 + \dots + R_n \cdot E^n \tag{2}$$

其中: $R(\lambda)$ 为 CCD 成像单元光电转换的光谱响应度,包括 CCD 光电转换效率和后续电子学增益偏置等参数; T_{int} 为 CCD 成像电子学系统积分时间; $E(\lambda)$ 为入射到 CCD 上的光谱辐射照度; DN_0 是 CCD 在零辐照下的信号输出(暗信号输出); R_1 是 CCD 的线性响应系数,也称为绝对辐射响应度; R_2, R_3, \dots, R_n 为二次以上的高次响应系数。式(2)中,高次项系数越接近于 0,则 CCD 响应越接近线性。此时,CCD 响应关系为线性响应,则这种定量关系可简单的表示为

$$DN = DN_0 + R_1 \cdot E \tag{3}$$

由式(1)与式(3)可以得到 CCD 响应关系与波长的函数关系

$$DN(\lambda) = DN_0(\lambda) + R_1(\lambda) \cdot E(\lambda) \tag{4}$$

式中: $R_1(\lambda)$ 为系统响应系数,包括大气投射比 $\tau(\lambda)$ 、CCD 光谱响应度 $R_{CCD}(\lambda)$ 、测量设备的仪器函数 $K(\lambda)$ 和测量设备光学系统相对光谱透过率 $C_{sys}(\lambda)$ 。

对于面阵结构线阵输出的 TDICCD,每个像元的输出数码值可以认为是矩阵上的一个元素。因此,TDICCD 的输出数码值可以用一个 $N \times M$ 矩阵表述,其中 N 为 TDICCD 的积分级数,取图像灰度值时默认为 N 行的平均,所以将 N 置 1。TDICCD 每个像元均满足式(4),因此可以用“辐射响应函数矩阵”^[9]表示 TDICCD 每个像元的波长响应关系,即有

$$[DN_{1,1}(\lambda) \dots DN_{1,i}(\lambda) \dots DN_{1,M}(\lambda)] = [DN_{0,1,1}(\lambda) \dots DN_{0,1,i}(\lambda) \dots DN_{0,1,M}(\lambda)] + [R_{1,1}(\lambda) \dots R_{1,i}(\lambda) \dots R_{1,M}(\lambda)] \cdot E(\lambda) \tag{5}$$

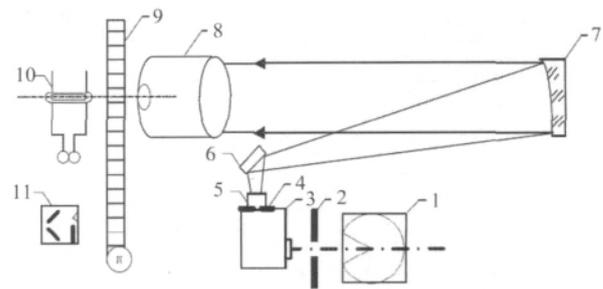
3 CCD 光谱特性筛选装置的研制

图 2 是 CCD 光谱特性筛选装置示意图,可进行 CCD 的相对光谱响应度一致性的检测,并由此得到 CCD 的峰值波长、中心波长、半峰值带宽(FWHM)和光谱分布等光谱参量。装置的主要组成有电动位移机构、光谱测试组件、积分球光源组件和总控系统,表 1 列出了装置主要构成及其用途。

系统工作过程如下:待测 CCD 器件放置在特定工作台上,工作平台固定在高精度水平滑移台上,由步进电机控制移动,实现待测 CCD 器件位置的精

细调整。积分球光源发出的均匀光照亮单色仪的入射狭缝,经过单色仪中光栅的分光成为单色光^[10,11](当单色仪未工作时为白光),并通过单色仪出射狭缝输出。投射物镜将单色仪狭缝像投射在反射镜上,反射镜放置在平行光管焦面位置,其经过平行光管实现准直单色光输出。再经过反射镜改变光路方向,最终通过成像物镜将狭缝像成像在载物台的 CCD 上。根据 CCD 所采集的图像,计算出 CCD 的光谱参量。

CCD 光谱特性筛选装置的软件界面操作简单,在软件开发中利用 Matrox 图像采集卡配套的开发库结合 Matlab 的算法设计,进行复杂的图像数据处理,避免了重复劳动,使用简单而且实现了实时处理。软件界面基于 VB.NET 开发,提高了软件质量,确保了软件稳定性,缩短了开发周期^[12]。



1: Integrating sphere light source; 2: Entrance slit; 3: Monochromator; 4: Filter disk; 5: Projection objective; 6: Catoptron specular; 7: Collimator; 8: Imager; 9: Motorized precision translation stages; 10: CCD driver board and support frame; 11: Quantum well detector

图 2 CCD 光谱性能筛选装置示意图
Fig. 2 Sketch of screening device for CCD spectral conformance

表 1 CCD 光谱特性筛选装置的主要构成

Tab. 1 Main compositions of the screening device for CCD spectral conformance

NO.	Component name	Equipment name	Application	The main technical indicators
1	Electric displacement mechanism	High-precision horizontal slip	Automatic control, the positive and negative mobile	Stroke: 500 mm Repeat positioning accuracy: ≤ 0.005 mm Maximum speed: 40 mm/sec Resolution: 0.001 25 mm Pitch: $\phi 1''$ ($\phi 25.4$ mm) Available Quantity: 6 Repeat positioning accuracy: ≤ 0.005 mm The cut-off filter: 300 nm, 600 nm, 900 nm Plane accuracy: ≤ 0.1 mm
		Electric filter wheel	Place cut filter to eliminate secondary spectrum	
		Supporting mechanism	To ensure the stability of the slip table and spectral test components	
2	Spectral test components	Grating monochromator	Pure monochromatic	Spectral range: 330—1 000 nm (linear dispersion 0.8 nm/mm, repeatability 0.08 nm, resolution 0.03 nm) stray light: $\leq 0.05\%$ Minimum step: 0.002 3 nm Detector wavelength response range: 200 nm—1 100 nm The detector non Stability ($(20 \pm 5)^\circ\text{C}$): $\leq \pm 0.08\%/h$ Relative sensitivity: 5×10^{-4} (maximum output signal 5 V) A/D Accuracy: 16; signal-to-noise ratio: ≥ 60 dB Reflective structure focal length 1 500 mm, relative pore size 1/15 The imaging lens focal length 300 mm, relative pore size 1/3 Accuracy of the DC power supply: 0.005% Long-term stability: 0.05%/year
		Quantum well detectors	The passing benchmark standard detector	
		Collimator and imaging objective	Collimated monochromatic imaging CCD photosensitive surface	
		Data acquisition device	Acquisition the detectors output data	

3	Integrating sphere assembly	Integrating sphere	Diffusely reflected light	Inner diameter 300 mm, opening 50 mm, 4 15 W tungsten halogen lamps Measured reflectivity: $\geq 97\%$ (450 nm~900 nm) Integrating sphere outlet uniformity: 99.8% Integrating sphere outlet cosine: 98.9%
		Integrating sphere support assembly	Integrating sphere stable	Plane accuracy: ≤ 0.1 mm
		Detector acquisition circuit		CPLD+MCU control
4	Master Control System	Stepper motor controller	High precision slip drive Filter wheel drive	Drive 57 stepper motors (maximum current 3A) Scan Mode: 2, 4, 8, 10, 20, 40 The deceleration: trapezoidal wave deceleration Software: VB, NET, Matlab 7 Image acquisition: VB, NET, Maxtor acquisition card interface
		PC+frame grabber+control software Communication	Image acquisition, testing control	
Interface: RS232, Camera-Link				

4 CCD 光谱特性一致性筛选与评估方法

CCD 光谱特性筛选装置是利用积分球光源, 单色仪输出准直单色光, 并经过光学系统成像, 将单色仪狭缝像成像到 CCD 的光敏面上, 得到不同光谱 CCD 输出图像。根据由中国计量院传递的量子阱探测器获得该系统的相对光谱辐射分布, 以此为基准计算 CCD 的相对光谱响应度^[13], 并由光谱响应曲线得到 CCD 的相关光谱参量。

1) 单色仪波长定标。单色仪提供标准的单色辐射, 单色仪本身是否标准非常关键。利用汞灯作为光源, 照明单色仪入射狭缝, 采用量子阱探测器作为接收装置。控制单色仪进行波长扫描, 汞灯特征谱线位置为 404.7、435.8、546.1、577.0 和 579.0 nm, 利用以上特征谱线建立单色仪扫描与波长位置间的关系。

2) 实验过程中, 可以预先设定一个最大照度和一个最小照度, 分别测试 CCD 和量子阱探测器的饱和情况、动态范围和信噪比, 并建立照度表 E_1 、 \dots 、 E_h 。

量子阱探测器作为基准探测器, 光谱响应范围宽、量子效率高、光谱灵敏度高并具有良好的线性、稳定性, 是绝对定标中常用的传递基准。将量子阱探测器置于成像物镜后, 启动单色仪使各单色辐射

依次入射到量子阱探测器接收面上, 当波长为 λ 、照度为 $E(\lambda)$ 的单色光辐照时, 结合式 (4), 量子阱探测器输出数码值与单色辐射照度的关系为

$$DN_{qtw}(\lambda) = DN_{qtw0}(\lambda) + R_{qtw0}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot C_{sys}(\lambda) \cdot E(\lambda) \quad (6)$$

式中: $\tau(\lambda)$ 为大气投射比; $R_{qtw0}(\lambda)$ 为量子阱探测器的光谱响应度, 需要引入中国计量院的传递值做修正; $K(\lambda)$ 为系统的仪器函数; $C_{sys}(\lambda)$ 为光学系统相对光谱透射率; $DN_{qtw}(\lambda)$ 为量子阱探测器在辐照度 $E(\lambda)$ 下的数码输出; $DN_{qtw0}(\lambda)$ 为量子阱探测器零辐照下的数码输出。保持探测器不变, 等照度间隔重复上面的测试并记录数据。

3) 在单色仪不变的情况下, 用 TDICCD 及其控制系统替换量子阱探测器。成像物镜所成的狭缝像均匀但不能充满 TDICCD 视场结合, 以 TDICCD 像元均值表征整片 CCD, 结合式 (5), M 个像元均值与单色辐射亮度的关系为

$$\overline{DN_{tdi0}}(\lambda) = \overline{DN_{tdi0}}(\lambda) + \overline{R_{tdi0}}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot C_{sys}(\lambda) \cdot E(\lambda) \quad (7)$$

式中, $\overline{R_{tdi0}}(\lambda)$ 为 TDICCD 的光谱响应度。等照度间隔改变积分球光源, 重复上述的测试并记录数据^[14]。

4) 依据照度表多点拟合, 整理式 (6)、式 (7) 得

$$\frac{DN_{qtw}(\lambda)' - DN_{qtw0}(\lambda)'}{\overline{DN_{tdi}}(\lambda)' - \overline{DN_{tdi0}}(\lambda)'} = \frac{R_{qtw0}(\lambda)' \cdot \tau(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot C_{sys}(\lambda) \cdot E(\lambda)}{\overline{R_{tdi0}}(\lambda)' \cdot \tau(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot C_{sys}(\lambda) \cdot E(\lambda)} = \frac{R_{qtw0}(\lambda)'}{\overline{R_{tdi0}}(\lambda)'}$$

$$\overline{R_{tdi0}}(\lambda)' = \frac{\overline{DN_{tdi}}(\lambda)' - \overline{DN_{tdi0}}(\lambda)'}{DN_{qtw}(\lambda)' - DN_{qtw0}(\lambda)'} \cdot R_{qtw0}(\lambda)' \quad (8)$$

$\overline{R_{tdio}(\lambda)}$ 即为 TDICCD 的相对光谱响应度。

用所有相对光谱响应度数据 $\overline{R_{tdio}(\lambda)}$ 除以峰值相对光谱响应度 $\overline{R_{tdio}(\lambda)}_{MAX}$, 得到归一化的相对光谱响应度

$$R(\lambda') = \frac{\overline{R_{tdio}(\lambda)'} }{\overline{R_{tdio}(\lambda)}'_{MAX}} \quad (9)$$

$\overline{R_{tdio}(\lambda)'}_{MAX}$ 最大值所对应的波长即为峰值波长 λ_p , $\overline{R_{tdio}(\lambda)'}_{MAX}$ 积分值 1/2 所对应的波长即为中心波长 λ_B , 50% 的 $\overline{R_{tdio}(\lambda)'}_{MAX}$ 最大值所对应的波长间隔即为半峰值带宽 $\Delta\lambda$ 。

使用光谱特性筛选装置对某批次 x 只 TDICCD 进行光谱性能一致性测试, 分别建立不同编号 TDICCD 与光谱性能指标的数据表格。例如从 x 只 TDICCD 中挑选出 k 只用于 CCD 拼接, 则求 x 个数据中方差最小的 k 个数据, 综合考虑光谱响应曲线及其相关光谱参量指标从中挑选出结果最优的一组, 作为最终待拼接的 TDICCD。Matlab 算法代码如下:

```

k = floor(k), % 把 k 截为整数;
[x_sort index] = sort(x), % 对数据 x 排序;
n = length(x), % 数据 x 的长度;
for i = 1:(n-k+1), % 对排好序的数据求所有相邻 k 个值的标准方差
    std_x_sort(i) = std(x_sort(i:(i+k-1)));
end;
[min_std_x_sort j] = min(std_x_sort), % 求最小的相邻 k 个值的标准方差和下标;
i = index(j:(j+k-1)), % 求最小的相邻 k 个值在 x 向量中的下标;
y = x(i), % 返回值 y 是 x 中方差最小的 k 个数据, i 是 y 的元素在 x 向量中的下标。
    
```

5 筛选与分析

对 DASAL 公司某 4096 像元的 TDICCD 进行筛选实验。该 TDICCD 是面向高性能成像系统设计的科学级芯片, 像元大小为 $8.75 \mu\text{m} \times 8.75 \mu\text{m}$, 光敏面积为 60.2 mm^2 , 驱动该 TDICCD 工作的 CCD 控制器是项目自研的控制采集系统。从 10 只 TDICCD 中挑选出 4 只光谱特性接近的 CCD 用于拼接。

实验室暗室环境, 温度为 $22 \text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度为 45%。调节积分球光源, 由大至小设定 5 个照度点, 光谱扫描范围为 $450 \sim 950 \text{ nm}$, 间隔为 1 nm 。TDICCD 选择 4 级 0 db。在 CCD 光谱筛选装置上

分别对 10 只 TDICCD 进行测试, 测试结果见表 2 和图 3 所示。

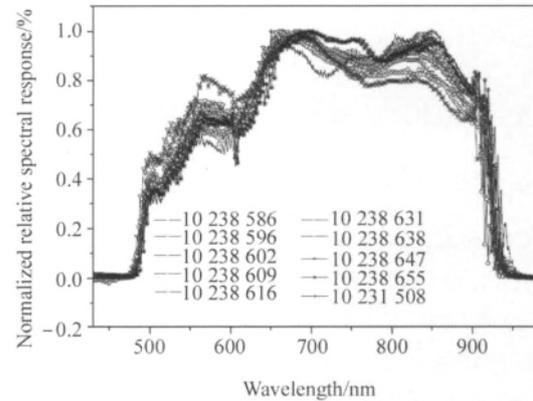


图 3 10 只 TDICCD 相对光谱响应

Fig. 3 Relative spectral responses of 10 TDICCDs

表 2 10 只 TDICCD 光谱参量

Tab. 2 Spectral parameters of 10 TDICCDs

CCD	Peak wavelength/nm	Central Wavelength/nm	FWHM /nm
10 238 586	662	722	540-916
10 238 596	660	726	536-920
10 238 602	670	718	514-924
10 238 609	664	730	544-924
10 238 616	670	714	532-914
10 238 631	660	726	536-918
10 238 638	680	724	532-924
10 238 647	688	708	518-906
10 238 655	698	734	548-922
10 238 508	850	740	540-926

由表 2 的峰值波长、中心波长和 FWHM 3 个光谱指标进行筛选可以发现, 10238586、10238596、10238609 和 10238631, 4 只 TDICCD 的光谱指标的一致性最好。由图 4 的数据分析发现, 这 4 只 TDICCD 的相对光谱响应度最大偏差小于 5%, 其他只 TDICCD 组合的最大偏差至少是 8%, 表明这 4 只 TDICCD 组合最优。

筛选装置的误差来源^[15]主要有

1) 在 $400 \sim 1000 \text{ nm}$ 的光谱范围, 量子阱探测器的由中国计量院传递的不确定度 3%, 测量的不确定度一般在 0.5%;

2) 单色仪的波长重复性引入误差为 0.05%;

3) 由积分球光源的稳定性、均匀性、杂散光等原因引起误差, 产生的不确定度 1%;

- 4) 杂散光干扰,背景辐射等引入误差 1%;
5) TDICCD 成像电路的不确定度 1%。

$$\sigma =$$

$$\sqrt{0.03^2 + 0.005^2 + 0.0005^2 + 0.01^2 + 0.01^2 + 0.01^2}$$

$$= 3.5\%$$

因此,筛选测试的精度可以保证在 3.5% 以内。

6 结论

从 CCD 辐射响应函数的角度出发,结合相对光谱响应测试,设计并研制了一套用于宽视场空间相机的 CCD 光谱筛选装置。

实际使用表明,本文筛选装置功能完善,操作简单,筛选结果客观准确,测试精度达到 3.5%;并且,装置集成度高,筛选测试所耗人力物力小,节约了成本,大大减少了测试时间,满足航天任务时间紧任务重的要求,对多由单元 CCD 拼接构成的焦面阵列成像质量提供有力的技术支持。本文装置已被用于某宽视场 TDICCD 相机的研制,取得了良好的效果。

参考文献:

- [1] Chen Shi-ping. Design and test of space camera[M]. Bei Jing: China Astronautic Publishing House, 2003, 12: 236-250.
陈世平. 空间相机设计与试验[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003, 12: 236-250.
- [2] ZHANG Xing-xiang, REN Jian-yue. Mechanical interleaving assembly of TDICCD focal plane[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(5): 740-745.
张星祥, 任建岳. TDICCD 焦平面的机械交错拼接[J]. 光学学报, 2006, 26(5): 740-745.
- [3] XIAO Zhan-quan, ZHAI Lin-pei, DING Ya-lin, et al. Research of optical assembly errors effects on TDICCD camera[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2008, 29(5): 795-798.
肖占全, 翟林培, 丁亚林, 等. 光学拼接误差对 TDI-CCD 相机的影响[J]. 半导体光电, 2008, 29(5): 795-798.
- [4] Nivedita Sanwlani, Charu Singh, Prakash Chauhan, et al. Post-launch calibration of the INSAT-3ACCD geostationary satellite sensor[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(16): 4871-4885.
- [5] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, YANG Xiao-hu, et al. Spectral radiance responsivities calibration of limb imaging spectrometer[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2010, 21(3): 406-410.
薛庆生, 王淑荣, 杨小虎, 等. 临边成像光谱仪光谱辐亮度响应度定标研究[J]. 光电子·激光, 2010, 21(3):

- 406-410.
- [6] Michaela Schuster, Saulius Nevas, Armin Sperling, et al. Spectral calibration of radiometric detectors using tunable laser sources[J]. Applied Optics, 2012, 51(12): 1950-1961.
- [7] Junichi Nakamura. Image sensors and signal processing for digital still cameras[M]. U. S: CRC Press, 2006, 95-143.
- [8] CHEN Feng, ZHENG Xiao-bing. Influence of spectrum not matching on calibration precision of remote sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(3): 415-419.
陈风, 郑小兵. 光谱非匹配对光学传感器定标精度的影响[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 415-419.
- [9] REN Jian-wei, ZHANG Yan-qi, YE Zhao, et al. Establishment and application of CCD radiate response function matrix[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(5): 957-962.
任建伟, 张艳琪, 叶钊, 等. CCD 辐射响应函数矩阵的建立与应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 957-962.
- [10] SHANG Yuan-yuan, ZHANG Jie, GUAN Yong, et al. Design and evaluation of a high-performance charge coupled device camera for astronomical imaging[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(10): 104002-104011.
- [11] LIU Xu, REN Huan, BA Rong-sheng, et al. Full aperture measurement of transmissivity for large aperture optic components[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2010, 21(6): 907-910.
刘旭, 任寰, 巴荣声, 等. 大口径光学元件透射率全口径检测系统研究[J]. 光电子·激光, 2010, 21(6): 907-910.
- [12] YE Zhao, REN Jian-wei, LI Xian-sheng, et al. Screening device for the LED as spaceborne calibration light source[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(1): 64-71.
叶钊, 任建伟, 李宪圣, 等. 用于星上定标光源的 LED 筛选装置[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 64-71.
- [13] Andrew Walkera, Tim Eatona, Roy Stewarda, et al. The gaia challenge: testing high performance CCDs in large quantities[A]. Proc. of SPIE [C]. 2008, 7106: 71061-71076.
- [14] James M. Palmer, Barbara G. Grant. The art of radiometry [A]. Proc. of SPIE [C]. 2010, 184: 241-268.
- [15] YE Zhao, WAN Zhi, LI Xian-sheng, et al. Spectral calibration for the large aperture infrared radiometer. Spectroscopy and Spectral Analysis[J]. 2012, 32(7): 2-5.
叶钊, 万志, 李宪圣, 等. 大口径红外辐射计的光谱定标[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(7): 2-5.

作者简介:

叶钊 (1985-), 男, 天津塘沽人, 博士研究生, 主要从事光电仪器辐射定标研究及相关系统的设计与控制。