

CCD 光电参数测试系统的研制

周 跃, 闫 丰, 章明朝

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘 要: 研制了一套 CCD 光电参数测试系统, 可实现对 CCD 的无效像元、相对光谱响应、响应度、等效噪声照度、动态范围、面响应度不均匀性等光电参数的全自动测试。CCD 的相对光谱响应测试基于单光路直接比较法实现, 而其他 CCD 光电参数的测试则基于特制的积分球光源。四个可独立开关的溴钨灯分别安置于四个次积分球内, 经高精度电动光阑与主积分球级联, 主积分球壁上的照度计经标定后可实时测试积分球光源出口照度值。该光源色温不变, 可在大动态范围内以较高精度实现连续调节, 满足 CCD 光电参数测试的需求。利用上述装置对 E2V 公司科学级 CCD47-10B 进行了实际测试, 并分析了测量的不确定度。结果表明: 相对光谱响应测试覆盖光谱范围 400~1 000 nm, 不确定度为 4.37%。光电转换参数测试装置距离光源出口 23 mm 处照度覆盖动态范围 0~235 lx, $\Phi 80$ mm 范围内照度均匀性达到 99%, 测试不确定度为 4.9%。该系统可用于航天级 CCD 的光电参数测试及芯片甄选。

关键词: CCD; 动态范围; 全自动测试; 不确定度

中图分类号: TN386.5; TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3451-06

Development of measurement instrument for photoelectric parameters of CCD

Zhou Yue, Yan Feng, Zhang Mingchao

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

Abstract: A measurement system for testing the photoelectric parameters of CCD was developed. It can realize automatic testing for the photoelectric parameters of various types of linear or area CCD, including invalid pixels, relative spectral responsivity, saturation irradiance, responsivity, equivalent noise irradiance, dynamic range, linearity, threshold illuminance, nonuniformity. The measurement system for relative spectral responsivity of CCD was based on the method of direct comparison of single optic path. The other parameters measurement system was built on a special designed integrating sphere light source. Four halogen lights was plant in four secondary integrating spheres, then cascaded with main integrating sphere using high-precision electric diaphragm. After calibrated, the light meter planted on the wall of main integrating sphere can test the luminance of export in real-time. The color temperature of the light source unchanged, the luminance of export was uniform, and can adjust in a large dynamic range continuously. The demand of testing the photoelectric parameters of CCD was satisfied. The photoelectric parameters of

收稿日期: 2014-02-05; 修订日期: 2014-03-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2012AA03A707)

作者简介: 周跃(1983-), 男, 博士, 主要从事探测器参数测试与辐射定标方面的研究。Email: zhouy385@ciomp.ac.cn

CCD47-10B was tested, and then the uncertainty of those systems was analyzed. Results indicate that the spectrum range of measurement system of relative spectral responsivity is 400-1 000 nm, the uncertainty is 4.37%. At the distance of 23 mm from exit port of source in measurement system for photoelectric transform parameters of CCD, the dynamic range of luminance was 0-235 lx, and the irradiance uniformity within $\Phi 80$ mm has reached 99%, the uncertainty is 4.9%. The measurement system can be used in testing the photoelectric parameters of aerospace-grade CCD and filtering it.

Key words: CCD; dynamic range; measurement system; uncertainty

0 引言

CCD 自 1970 年问世以来,在像元数、像元尺寸、灵敏度、功耗、可靠性等方面已有了极大的提升,被广泛地用于工业监控、精密测量和检测、医学诊断、空间遥感、导弹寻的、资源卫星等工业、民用、军工和安全监控诸多领域^[1-3]。目前,国内 CCD 器件研制及光电参数测试方面与国外差距较大,而 CCD 的应用极为广泛,种类也越来越多。如何正确地选择和应用 CCD 是科研工作中面临的实际问题。同时,西方发达国家高端航天级 CCD 价格极为昂贵,单片高达数百万人民币,且大部分对国内禁售。为节约研发成本,国内的航空、航天等应用领域通常购置国外商业或工业级 CCD 芯片按照器件性能进行甄选,而器件性能通常由光电参数表征。因此对于 CCD 器件应用、整机设计与性能评估来说,CCD 光电参数的准确测试是关键支撑技术。

发达国家对 CCD 光电参量测试技术极为重视,法国航天局开发的 Corot CCD 测量系统^[4]可测试天文应用的大尺寸 CCD 器件的线性度、像素不均匀性、温度系数等光电参数,而南欧天文台光学探测小组开发的 ESO CCD TestBench 摄像机测试系统^[5]可用于天文台各系统应用中的多种 CCD 摄像机光电参数的测试。国内公开文献中对 CCD 光电参量测试技术研究多面向线阵 CCD。1994 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所建立了国内首个线阵 CCD 光电参量测试系统^[6],含有线阵 CCD 光谱响应度测试系统以及以积分球光源为核心的其他光电参量测试系统,可测试动态范围、光谱响应度、响应不均匀性等光电参量,通过手动调节光阑及插入中性衰减片的方式实现照度变化,动态范围有限,且积分球照度均匀性不佳。叶培建等人构建的线阵 CCD 器

件参数测试系统^[7]可用于测试线阵 CCD 的光电和几何参数,其通过调节光源与 CCD 的距离或插入衰减量不同的中性滤光片实现照度变化,光源均匀性降低,不确定度较大。项勤建^[8]、张倩^[9]采用 LED 构建的线阵 CCD 参数测试系统成本低廉,其匀光装置采用了 LED 光源直接照射普通毛玻璃,测试精度低,仅适用于实验教学。

近年来,CCD 器件快速发展,在灵敏度及动态范围方面已大幅提升,现有测试装置已无法满足器件光电参数测试需求^[10-11]。文中设计并实现了基于单光路直接比较法的 CCD 相对光谱响应度测试装置及以特制大动态范围积分球光源为基础的 CCD 光电转换参数测试装置,并采用美国 NI 公司的图形化编程语言 Labview^[12]编写了自动化测试软件,实现了对各类型线阵或面阵 CCD 器件的光电参数全自动测试。实际测试了 E2V 公司科学级 CCD47-10B,并分析测试系统的最大不确定度。

1 CCD 光电参数及测试需求

CCD 光电参数众多,主要光电参数包括相对光谱响应、响应度、饱和曝光量、无效像元(瑕疵元或盲点)、噪声、等效噪声照度、阈照度、面响应度的不均匀性、动态范围、线性度等。各光电参数的定义可参照相关标准和规范^[13-14]。

分析 CCD 的光电参数定义可知:首先,测试 CCD 相对光谱响应需可调节波长的单色光源;其次,通过对比测试 CCD 在无光照和有光照条件下的输出图像分析,可以获知 CCD 的暗噪声、无效像元;再次,测试响应度、动态范围、线性度、饱和照度需要辐照度能够在动态范围内连续可调的标准 A 光源;最后,完成 CCD 的响应度非均匀性测试需要一个在 CCD 靶面非常均匀的辐照场。要注意的是,在

响应度等光电参数的测试中,测试结果一般都面向 CCD 靶面所有像元给出,为测试准确,也要求对 CCD 靶面均匀照明。

2 CCD 相对光谱响应度测试装置

2.1 测试原理

探测器相对光谱响应测试可归纳为四种基本方法:宽带滤光片法、标准替代法、单光路直接比较法、傅里叶变换法。相对而言,直接比较法将探测器在单色辐照下的输出与已知相对光谱响应的参考探测器进行比较,测量同步,对光源的稳定性要求不高,易于实时处理,实现测量自动化,目前应用广泛^[15]。

在单光路直接比较法中,需先测试参考照度计在单色光 $E(\lambda)$ 均匀照射下的输出信号,设为 $V_C(\lambda)$,然后将被测 CCD 移至同一单色光照射下,记录其输出信号 $V_T(\lambda)$,则在波长 λ 单色辐照下的被测 CCD 的相对光谱响应:

$$S_T(\lambda) = \frac{V_T(\lambda) - V_{T_dark}}{V_C(\lambda) - V_{C_dark}} \cdot S_C(\lambda) \quad (1)$$

式中: V_{C_dark} , V_{T_dark} 分别为参考探测器和被测 CCD 的暗信号输出; $S_C(\lambda)$ 为参考探测器的相对光谱响应,在测量之前由辐射基准完成量值传递。对各个波长的相对光谱响应进行归一化处理,即可求得被测 CCD 的归一化相对光谱响应曲线。

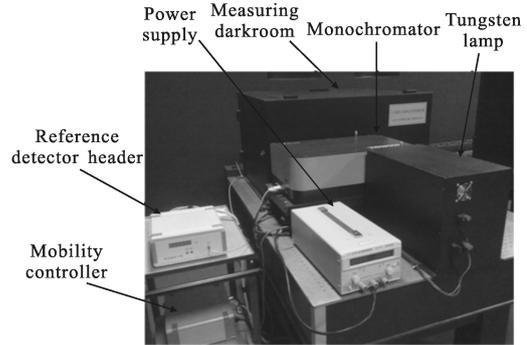
2.2 测试装置

基于上述原理设计实现的 CCD 相对光谱响应装置如图 1(a)所示,可分为基本光源、单色仪、测试暗室及数据采集处理等四个部分。系统基本光源选用 π 型溴钨灯,配合高稳压稳流电压源,其发光强度稳定性优于 0.1%/0.5 h。单色仪选用塞凡两光栅单色仪。光谱范围 350~1 100 nm,重复性为 0.05 nm,线色散为 1.7 nm/mm,分辨率为 0.05 nm,杂散光 < 0.05%。

测量暗室用于减小杂散光干扰,保证测试精度。暗室内参考探测器和被测 CCD 被固定在高精度电动位移台上,计算机可通过电仪台控制器实时切换参考探测器和被测 CCD 被单色仪出射辐射照射,如图 1(b)所示。参考探测器选用高灵敏度硅光电二极管,已由中国测试计量研究院完成光谱灵敏度定标。

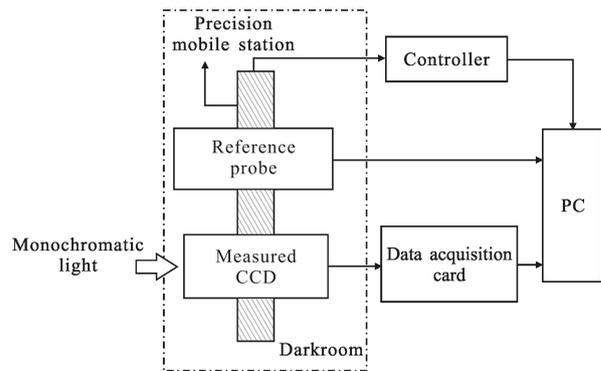
CCD 的输出信号采用被单色仪出射狭缝照亮的均匀区域内像元平均值。完成暗噪声测试后,调节单色仪输出起始波长,参考探测器与被测 CCD 被交

替切换到单色仪出射辐射照射下,计算机则记录二者的输出信号值。由公式(1)得到被测 CCD 在波长下的相对光谱响应。通过控制单色仪按照一定波长 $\Delta\lambda$ 步进,完成测试光谱范围内的相对光谱响应测试。



(a) 装置结构

(a) Construction of equipment



(b) 暗室内装置框图

(b) Block diagram of measurement system in darkroom

图 1 CCD 相对光谱响应测试装置

Fig.1 Measurement system for relative spectral responsivity of CCD

3 CCD 光电转换特性参数测试装置

除相对光谱响应外,CCD 其他光电参数有无效像元、饱和曝光量、响应度、等效噪声曝光量、动态范围、线性度、阈照度、响应度不均匀性等。在第二节提出,上述参数的测试需用一辐射出射度在大动态范围内连续可调且均匀的标准 A 光源。

目前,CCD 在面阵大小、动态范围、灵敏度等方面均已经大幅提升^[12],如科学级 CCD 已能达到 80 dB,且已实现多片面阵 CCD 无缝拼接,同时面向特殊应用 CCD 的灵敏度也愈来愈高,这些发展对目前及未来的 CCD 光电转换参数测试在测试用光源照度动态范围,均匀光面积等提出了更高的要求。

3.1 测试装置设计

面向上述需求,积分球光源无疑是最优的选择。积分球为内壁涂有高反射率材料的中空球体,其出射口均匀性极佳,是优异的朗伯体,在辐射定标及探测器参量测试中被广泛应用。考虑到目前及未来的 CCD 光电转换参数测试需求,该装置的设计关键指标为:装置辐照度动态范围为 0~200 lx,均匀辐照度场大于 $\Phi 80$ mm,辐照场内均匀性高于 98%。

为实现光源色温不变,而辐照度在大动态范围内连续变化,设计了特制的级联的积分球光源。如图 2 所示,采用了两级积分球结构,主积分球内径为 $\Phi 500$ mm,内壁用高纯度(0.999 9)Hallon 粉末涂压而成,其反射率 $\rho > 96\%$,出射口面积 $\Phi 100$ mm。为满足照度场动态范围需求,同时保证均匀性,系统基本光源采用四只溴钨灯,其寿命大于 1 000 h,稳定性优于 0.1%/0.5 h,被固定在四只次积分球内(图 2 中只画出了一只次积分球)。次积分球内径直径 $\Phi 100$ mm,开口 $\Phi 20$ mm,均匀分布在主积分球的四周。次积分球通过可变光阑与主积分球相连,可变光阑为步进电机驱动的刀口,可调节范围 0~ $\Phi 25$ mm。

溴钨灯出射辐射经次积分球混光后入射到大积分球,再次经球壁多次反射在出射孔的漫射器表面形成均匀性光场,其照度均匀性在内光场 80 mm 区域内达到 99% 以上。

四个主次积分球之间的可变光阑可由计算机分别控制打开或关闭,原则上可实现任意微弱的照度。

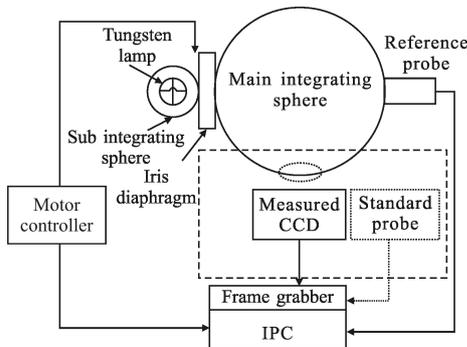


图 2 CCD 光电转换特性参数测试原理图

Fig.2 Block diagram of measurement system for photoelectric transform parameters of CCD

为在保证系统测试精度的同时实现全自动测试,特设计加入了标准照度计和参考照度计。标准照度计经过中国测试计量研究院定标,放置于主积分

球出口外的暗室内,而参考照度计被固定于主积分球壁上。测试前先将标准照度计放置于 CCD 光敏面位置,将 CCD 光敏面的照度值过渡到参考照度计。这样,参考照度计示值即为被测 CCD 光敏面的照度值。图像采集卡采集被测 CCD 的输出图像,在工控机上通过调节可变光阑改变 CCD 光敏面的照度值,同时获取到当前 CCD 光敏面的照度值及 CCD 的实时输出图像,即可完成 CCD 的光电转换特性参数的测试。该装置实物如 3 所示。

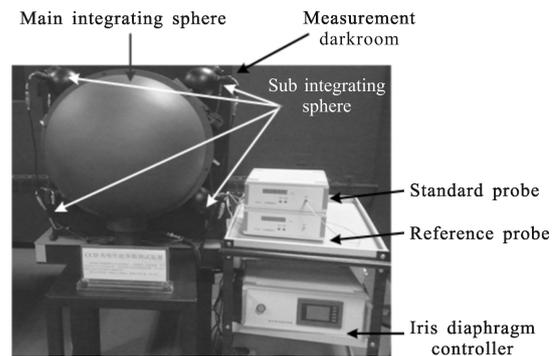


图 3 CCD 光电转换特性参数测试装置

Fig.3 Measurement system for photoelectric transform parameters of CCD

经标准照度计实际测试,在距离主积分球出口 23 mm 处,照度可调节动态范围 0~235 lx, $\Phi 80$ mm 范围内照度均匀性达到 99%,满足 CCD 光电转换参数测试需求。

3.2 测试步骤

使用图 2 所示装置开展 CCD 光电转换特性参数的测试步骤如下。

(1) 开启光源电源为小积分球内的溴钨灯供电,调节供电电流使灯工作在 CIE 标准 A 光源色温下,预热 10 min。

(2) 参考照度计的定标。按照积分球理论,越靠近积分球出口或远离出口照度越均匀,故需将被测 CCD 尽量靠近积分球出口(暗室空间有限),待 CCD 位置固定后记录光敏面位置。然后将标准照度计放置在积分球出口,其光敏面与 CCD 光敏面位置重合。在标校零点后,调节积分球入口光阑改变照度值,将积分球出口照度过渡到积分球上的参考照度计。在测试过程中计算机则可通过参考照度计实时测试 CCD 光敏面的照度值。

(3) 暗噪声、饱和照度的测试。CCD 重新固定后,完

全关闭积分球入口光阑,通过数据采集卡获取在无光照条件下的多帧图像,得到 CCD 各像元的暗噪声及平均噪声。其后,持续打开光阑,观察 CCD 输出平均灰度直至不再增加,设置此时的照度为 CCD 的饱和照度值。

(4) 获取 CCD 的响应度曲线。从关闭光源光阑(此时照度为 0 lx)开始,控制光源光阑使照度按饱和曝光量的 5% 步进,记录此时的 CCD 靶面照度 E_i 及 CCD 的响应平均灰度 R_i ,直至 CCD 输出饱和,即可得到该 CCD 的响应度曲线。对 CCD 饱和曝光量的 10%~90% 之间的响应平均灰度使用最小二乘法拟合得到 CCD 的响应非线性。在约饱和照度的 60% 左右采集多帧 CCD 响应曲线,计算得到 CCD 面响应度非均匀性。结合之前的暗噪声等参数,即可测试得到无效像元、噪声等效照度、阈照度等 CCD 的光电参数。

4 实际测试

上述装置适用于已配置读出电路的 CCD 光电参数测试,同时对美国 Princeton Instrument 公司的 PIXIS:1024B 面阵 CCD 探测器进行实际测试。该探测器 CCD 芯片为 E2V 公司的背照式全帧转移 CCD47-10B,像素尺寸为 $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$,分辨率为 1024×1024 。该探测器数据通过 USB2.0 传输到计算机,AD 转换位数为 16bits。

CCD 光电转换特性参数测试结果如表 1 所示,对比厂家部分给出的光电参数,该芯片暗噪声极低,可以忽略不计,在 2M 读数速度下读出噪声 RMS 典型值为 9,最大值为 15,文中研制的装置测试结果为 11。响应度非线性标称 $<1\%$,实测为 0.02% 。CCD 的

表 1 CCD 光电转换特性参数测试结果

Tab.1 Test result of photoelectric transform parameters of CCD

Photoelectric parameters of CCD	Test result
Noise	11.045
Saturation irradiance/lx	0.255
Dynamic range/dB	74.4
Threshold illuminance/lx	4.85×10^{-4}
Responsivity nonuniformity/%	2.859 3
Equivalent noise irradiance/lx	4.85×10^{-5}
Valid pixels ratio/%	100
Responsivity	2.28×10^5
Non-linearity/%	0.02

相对光谱响应曲线如图 4 所示,响应曲线见图 5。

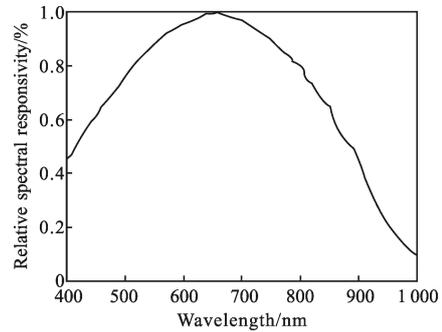


图 4 CCD 相对光谱响应曲线

Fig.4 Relative spectral responsivity of CCD

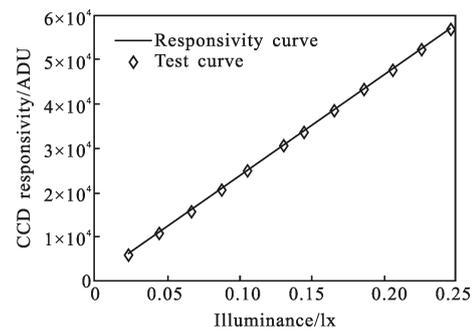


图 5 CCD 响应度曲线

Fig.5 Responsivity curve of CCD

5 不确定度分析

对 CCD 开展光电参数测试由于标准传递、量化等环节不可避免地存在各种误差,为准确估算测试精度,采用了目前通用的不确定度分析方法对上述装置的最大不确定度进行了详细分析。

5.1 相对光谱响应测试不确定度

对 CCD 相对光谱响应测试装置进行分析,其可能引入测试误差的环节有:(1)光源的稳定性,直接比较法测试时间长,光源的稳定性对测试的准确度至关重要,该装置使用卤钨灯经稳压的措施后光强度优于 $0.1\%/0.5\text{h}$,且测试过程中采用标准参考探测器与被测 CCD 交替测试,故光源不稳定性可忽略不计;(2)经中国测试计量研究院定标的硅光电探测器作为标准探测器,其不确定度为 3.8% ;(3)由单色仪出射的单色光具有一定的带宽,实际测量值是一窄谱带 $\Delta\lambda$ 内的积分灵敏度。用它来代替波长 λ 处的光谱灵敏度,引起的波长误差带来的不确定度为 0.8% ;(4)由 CCD 响应的非均匀性、测试系统中的杂散光、数据采集的读数误差带来的不确定度为

2%。经不确定度合成公式,最终该装置开展 CCD 相对光谱响应测试的最大不确定度为 4.37%。

5.2 光电转换参数测试不确定度

CCD 光电转换参数测试装置引入测试误差的环节主要有:(1)光源的稳定性,高稳定性溴钨灯作为系统基本光源,采用稳流稳压的直流电源,其电流的稳定性应优于 0.03%/0.5h,测试过程中采用参考探测器与 CCD 实时采集数据,光源的不稳定性可以忽略不计;(2)标准探测器与基准过渡到参考探测器带来的不确定度。标准探测器由中国测试计量研究院完成定标,其不确定度为 4%,测试中将标准探测器过渡到主积分球壁的参考探测器,由于定位基准传递过程带来的不确定度为 2%;(3)由测试环境的杂散光、CCD 数据采集、量化带来的不确定度为 2%。

CCD 光电转换参数众多,不同的参数涉及到的不确定度略有差异,由不确定度合成公式^[6],可计算得到该装置测试光电转换参数的最大不确定度为 4.9%。

6 结论

CCD 光电参数的精确测试是 CCD 器件性能评估、应用及整机设计的基础支撑技术。文中设计并实现了 CCD 相对光谱响应度测试装置与 CCD 光电转换特性参数测试装置,可实现对各类线阵、面阵 CCD 的无效像元、相对光谱响应、饱和照度、响应度、等效噪声照度、动态范围、线性度、阈照度、响应度非均匀性等光电参数的全自动测试。

对 CCD 相对光谱响应开展测试覆盖光谱范围 400~1 000 nm,测试的最大不确定度为 4.37%。而光电转换参数测试装置的光照度在 0~235 lx 连续可调,且光源出口面积 $\Phi 100$ mm,内光场 $\Phi 80$ mm 范围内照度均匀性达到 99%,测试的最大不确定度为 4.9%。目前,该装置已用于我国航空级 CCD 光电参量测试及筛选中,测试结果对应用系统性能评估具有重要意义。

参考文献:

- [1] Xue Xucheng, Han Chengshan, Xue Donglin, et al. Increasing dynamic range of space push-broom remote sensing camera by two-row TDI CCD [J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(12): 2791–2803. (in Chinese).
- [2] James R J. Scientific Charge-Coupled Devices [M]. USA: SPIE Publications, 2001.
- [3] Ren Hang. High-resolution large area CCD camera frame rate design and its non-uniformity correction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1491–1497. (in Chinese)
- [4] E2V. CCD42–80 Back Illuminated High Performance CCD Sensor. A1A–CCD42–80 Back Illuminated [Z]. US: E2V, 1998: 1–6.
- [5] Amico P, Bohm T. The ESO CCD test bench [OL]. [2014–01–21]. <http://www.eso.org/projects/odt/CCDtestbench>.
- [6] Yi Zhongjie. Study on a test system of linear CCD photoelectric parameters [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1994, 2(4): 140–149. (in Chinese)
- [7] Ye Peijian, Liu Fuan, Cao Haiyi. The main performances and test method of the linear charge coupled device [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 1996, 16(3): 44–51. (in Chinese)
- [8] Xiang Qinjian. Research of linear CCD parameter test method and the establishment of measurement system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)
- [9] Zhang Qian. The measurement system of the linear CCD parameters [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [10] Liu Yanyan, Li Guoning, Zhang Yu, et al. Detection and record system of real time for static transfer function of the big visual field TDI CCD camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2515–2524. (in Chinese)
- [11] Zhao Yuliang, Xu zaolin, Li Kaiduan. Development and outlook of aerial CCD recon system [J]. *Optoelectronic Technology*, 2001, 21(4): 290–293. (in Chinese)
- [12] Zhang Laixian, Sun Huayan, Fan Guihua, et al. High efficiency laser active detection controlling and processing system design based on LabVIEW [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3239–3244. (in Chinese)
- [13] Liu Yin, Gong Xiaobin, Dong Lingchu, et al. Characteristics and parameters testing method for linear solid state image sensors specifications [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1994, 19(5): 57–64. (in Chinese)
- [14] JJF 1150–2006 Calibration Specification for Relative Spectral Responsivity for Photoelectric Detectors [S]. Beijing: China Metrology Press. (in Chinese)
- [15] Zhao Yuhuan, Yan Feng, Lou Hongwei, et al. Measurement technology for relative spectral responsivity of the ultraviolet ICCD [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(5): 1371–1374. (in Chinese)
- [16] Fan Qiaocheng. Measurement Uncertainty Simplified Method and its Application [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007. (in Chinese)