

CCD 相对光谱响应同步采样方法研究

崔珊珊, 孟炳寰, 裘桢炜, 洪津, 邹鹏

(中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室 中国科学院安徽光学精密机械研究所,
安徽 合肥 230031)

摘要: 连续可调谐均匀单色照明光源系统作为 CCD 辐射参量量化专用测试系统, 可用于 CCD 相对光谱响应度的测量。它与传统的测试装置相比, 能够实现光谱分辨率 1 nm 的光谱响应度定标。但是其采用的大功率氙灯超高压供电引入了测试光源不稳定的问题, 导致传统分时测量方法引起的测量不确定度较差, 不能满足高精度遥感仪器的定标需求, 因此提出了同步采样的方法。从理论和器件噪声模型出发, 分别对两种方法的测量不确定度进行分析, 得出同步采样的方法测得的定标不确定度优于 1.03%, 与传统分时测量方法相比不确定度提高了 43%。分别采用两种方法对目标探测器进行了 CCD 相对光谱响应对比测试, 结果显示, 同步采样的方法获得的 CCD 相对光谱曲线更平坦, 与出厂数据相比离散程度更低, 进而验证了分析结论的正确性。

关键词: CCD 相对光谱响应; 同步采样; 稳定性; 连续可调谐单色照明光源

中图分类号: O432.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3397-05

Study of synchronous sampling method for the relative spectral response of CCD

Cui Shanshan, Meng Binghuan, Qiu Zhenwei, Hong Jin, Zou Peng

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Continuously tunable monochromatic light source system is a dedicated test system for radiation parameter quantitatively of CCD, it can be used to measure the relative spectral response of CCD. Compared with the conventional test apparatus, the system is possible to achieve spectral resolution of 1 nm due to the use of the high-power xenon lamp. However, the lamp introduces instability problems. The conventional time-sharing measurement method can lead to poor measurement uncertainty, and can not meet the development needs of high-precision remote sensing instrument, and then a synchronous sampling method was proposed. Combining with the comprehender of the CCD calibration theoretical model, the measurement uncertainty of two methods was analyzed. The result shows that the synchronous sampling uncertainty is better than 1.03%, which increases 43% compared with the traditional time-sharing measurement method. Otherwise, it also has a contrast testing using the two methods. As a result, the relative spectral response curve of the CCD received by the synchronous sampling method is more

收稿日期: 2015-03-07; 修订日期: 2015-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(41301373)

作者简介: 崔珊珊(1987-), 女, 博士生, 主要从事辐射测量学定标检测方面的研究。Email: cuishanshan13731@163.com

导师简介: 洪津(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光谱遥感技术、偏振遥感技术、航空/航天遥感器工程技术方面的研究。Email: hongjin@aiofm.ac.cn

flat, and the standard deviation is more low, which verify the correctness of the conclusions of the analysis.

Key words: relative spectral response of CCD; synchronous sampling; stability; continuously tunable monochromatic light source

0 引言

CCD (Charge Coupled Devices) 相对光谱响应与器件的材料、几何结构等因素有关, 是 CCD 的基本参数之一, 也是器件甄选、应用系统设计与性能评估的重要参考, 其相关测试是遥感仪器研制过程中的必要工作内容。

长期以来, 国内外对于 CCD 光谱响应测试方法作了大量研究。1998 年, 欧洲南部天文台开发了 ESO CCD Test bench 摄像机测试系统; 2004~2005 年间, 劳伦斯伯克利国家重点实验室完成用于测量 CCD 量子效率的装置; 2011~2013 年间, 国内西安电子科技大学设计了一套通用性强的 CCD 芯片量子效率测试装置。这些测量设备均采用普通光源和单色仪的组合, 光源强度有限, 主要用于光谱分辨率大于等于 5 nm 的光谱响应测试^[1-6]。随着光谱仪器测量精度要求的不断提高, 5 nm 光谱分辨率已不足以满足部分 CCD 光谱响应定标精度的测试需求。在此条件下, 设计了高分辨率连续可调谐均匀单色照明光源系统, 该系统采用大功率氙灯作为照明光源, 能够满足目标 CCD 在光谱分辨率 1 nm 时的测试能量要求。但由于大功率氙灯超高压供电使得灯内电弧产生较大的波动, 造成系统输出时间稳定性较差。传统的分时测量方法难以规避这个困难, 导致 CCD 定标精度不能达到预期水平。

针对以上存在的问题, 以中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的高分辨率连续可调谐均匀单色照明光源系统为例, 提出了同步采样的方法用以提高 CCD 相对定标测量精度。对 CCD 相对光谱响应定标两种采样方法引起的测量不确定度进行理论分析, 同时以 CCD55-20 系列面阵图像传感器为目标探测器, 分别采用两种采样方法对目标探测器进行了相对光谱响应实验室测试, 验证该分析方法的准确性和有效性。

1 测试系统简介

图 1 为连续可调谐均匀单色照明光源系统方案

原理图^[7-9]。光源发出的光经单色仪分光后入射至积分球内, 出射光由 CCD 接收, 参考探测器作为能量传递基准, 用于测量 CCD 接收的相对能量变化。测试系统时间稳定性测试结果见图 2, 相对标准偏差约 1.5%, 峰峰值相对偏差约 4.4%。

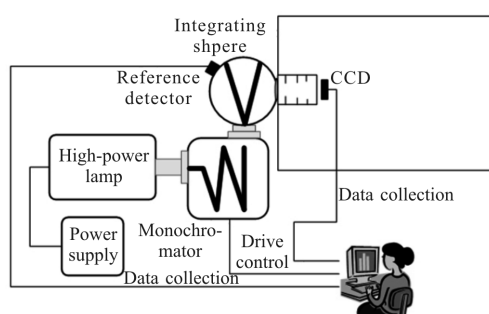


图 1 连续可调谐单色照明光源系统方案原理图

Fig.1 Schematic diagram of continuously tunable monochromatic light source system

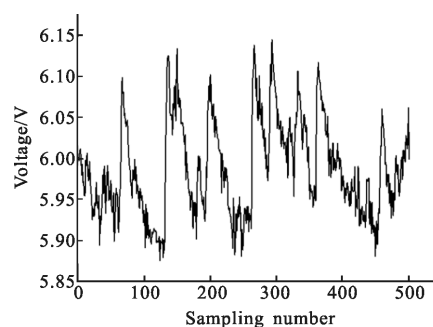


图 2 连续可调谐单色照明光源稳定性测试曲线

Fig.2 Stability test curve of continuously tunable monochromatic light source

在系统采样方法改进之前, CCD 与参考探测器独立采集信号, 指令分时发出, 这对于光源稳定性较差的测量设备, 两条指令之间的时间间隔造成的定标误差不容忽视, 于是提出同步采样的方法。

2 同步采样定标方法理论模型分析

波长 λ 均匀准单色光源照射目标 CCD, CCD 输出信号 $V(\lambda)$ 由公式(1)获得。

$$V(\lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \cdot \Phi(\lambda) \cdot t_{\text{int}} \cdot d\lambda + V_D$$

$\Phi(\lambda) = \phi(\lambda, t) \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot \eta(\lambda) \cdot \tau_n(\lambda) \cdot P(\lambda, x, y) \cdot [1 + S(\lambda, x, y)]$ (1)
 式中: R 为 CCD 辐射通量光谱响应; Φ 为目标 CCD 接收到的光谱辐射通量; t_{int} 为积分时间; V_D 为本底电压; Φ 为氙灯光源出射功率, 不同波长具有不同输出, 并随时间 t 变化; ε 为水冷滤光片光谱透过率, 水冷滤光片置于氙灯和单色仪之间起隔热作用; η 为单色仪分光效率; τ 为消二级光谱滤光片的光谱透过率, 下标 n 代表滤光片个数; P 为积分球匀光效率, 与涂层反射率、开口位置等有关; S 为系统杂散光。

测试过程中由参考探测器进行标准传递, 参考探测器输出信号 $V'(\lambda)$ 如公式(2)。

$$V'(\lambda) = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} R'(\lambda) \cdot \Phi'(\lambda) \cdot t_{\text{int}} + V_D'$$

$$\Phi'(\lambda) = \phi'(\lambda, t) \cdot \varepsilon'(\lambda) \cdot \eta'(\lambda) \cdot \tau_n'(\lambda) \cdot P'(\lambda, x, y) \cdot [1 + S'(\lambda, x, y)]$$
 (2)

式中: ε' 、 η' 、 τ_n' 、 P' 、 S' 为系统部件固有特性, 与公式(1)对应参数基本相同。 V_D 与 V_D' 的影响由输出信号减去本底电压消除。若待测 CCD 与参考探测器采用分时测量的方式, 氙灯光源出射功率 Φ 的变化会使 $V(\lambda)$ 与 $V'(\lambda)$ 出现较大波动, 造成较大测量误差。为了减小该误差源对测试精度的影响, 提出同步采样的方法, 即要求 CCD 与参考探测器同时观测, 通过上位机控制程序精确控制, 并保证同步控制精度。在同步采样前提下, 将公式(1)与公式(2)两者相比, 得到公式(3), 可以看出, 氙灯光源不稳定因素已经在比值过程中被去除, 减小了不确定度来源, 提高了定标精度。

$$\frac{V(\lambda) - V_D}{V'(\lambda) - V_D'} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \cdot \Phi(\lambda) \cdot t_{\text{int}} \cdot d\lambda}{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} R'(\lambda) \cdot \Phi'(\lambda) \cdot t_{\text{int}}} \approx \frac{R(\lambda)}{R'(\lambda)}$$
 (3)

3 相对不确定度分析

3.1 非同步性不确定度

CCD 定标方法改进后, 消除了系统时间稳定性影响, 但由于 CCD 是积分时间内快门控制曝光的工作模式, 曝光时间 ms 量级, 在与参考探测器同步采样过程中, 会存在一定的非同步性, 即 CCD 积分时

间无法达到参考探测器采样周期的整数倍^[10]。在非同步性采样这段时间内, 由于测试光源的时间波动性, 会对测试结果不确定度产生影响。示意图如图 3 所示, 不确定度最大值为恰好丢失参考探测器 1 个采样周期的数据, 此时假设两端点的信号大小分别为最大值与最小值。

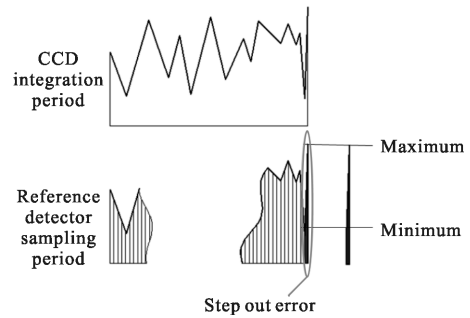


图 3 同步采样示意图

Fig.3 Schematic diagram of synchronous sampling

参考探测器信号频率约 250 kHz, 周期 0.004 ms, 光源峰峰值稳定性 4.4%, CCD 采样周期 20 ms。假设在积分周期内信号均值为 1, 如公式(4), V_{max} 最大取 1.044, 此时, 由非同步采样引起的不确定度约 0.02%。

$$\frac{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}}{1} = 0.044$$

$$\varepsilon_{\text{非同步}} = \frac{S_{\text{失步}}}{S_{\text{CCD 积分}}} = \frac{(V_{\text{max}} + V_{\text{min}}) \cdot 0.004 / 2}{1 \cdot 20} = \frac{(2V_{\text{max}} + 0.044) \cdot 0.004}{20 \cdot 2}$$
 (4)

3.2 单色仪引入不确定度

单色仪引入的测量不确定度包括波长准确性、杂散光等。杂散光是指由单色仪产生的二级光谱重叠引入的杂散光, 通过增加消二级光谱滤光片的方式予以减小。结合二级光谱滤光片透过率数据, 计算得出, 增加该滤光片后由杂散光对输出信号引起的不确定度约 0.03%。

波长准确性不确定度是指由中心波长差异引起的 CCD 测量值的不确定性, 包括光谱源与 CCD 响应谱两个与波长相关的数据, 光源出射功率谱乘以 CCD 光谱响应谱, 就是测试时的 DN 值光谱。在实验室条件下使用低压汞灯对单色仪进行波长定标, 得到单色仪的波长准确性优于 0.25 nm。图 4 为测试系统出射光源的相对光谱功率曲线图, 以出射光源功率变化最敏感的中心波长 470 nm 为例, 光谱分辨率

1 nm, 中心波长平移 0.25 nm 时, 该带宽内相对功率变化约 0.08%。相对而言, CCD 的响应谱比较平坦, 相对于光谱源引起 CCD 测量值的变化较小, 预估单色仪波长准确性不确定度约 0.1%。

于是, 由单色仪引起的总不确定度为 0.1%。

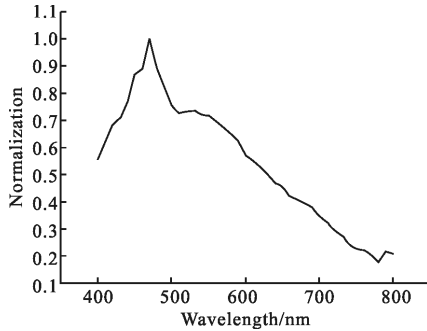


图 4 出射光源相对光谱功率曲线图

Fig.4 Relative spectral emission light power curve of the test system

3.3 CCD 噪声引起不确定度

CCD 自身的噪声是另一个主要的不确定度来源, 包括散粒噪声、复位噪声、1/f 噪声、白噪声、量化噪声等, 其噪声转移示意图如图 5 所示^[11-12]。

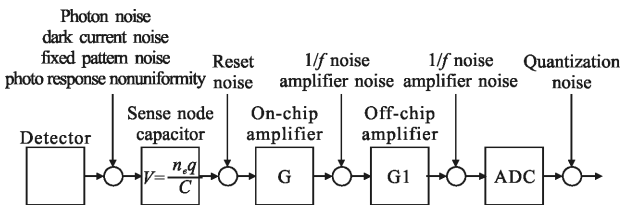


图 5 噪声转移示意图

Fig.5 Schematic diagram of noise transfer

理想情况下, 每个像素具有相同的暗电流, 其平均值可以从信号中消除, 但实际情况下, 这些暗电流存在波动, 减去平均值之后的暗电流波动信号形成噪声, 该噪声与光子随机噪声一起成为散粒噪声。CCD 噪声可由公式(5)获得。

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{reset}}^2 + \sigma_{\text{on-chip}}^2 + \sigma_{\text{off-chip}}^2 + \sigma_{\text{ADC}}^2} \quad (5)$$

其中, 复位噪声、1/f 噪声等可以通过相关双采样的方式予以减小, 片上放大器噪声一般芯片生产厂家会以读出噪声的形式给出, 而片外放大器噪声与芯片上的放大器噪声相比可以忽略, 量化噪声则通过选择合适的模数转换器予以减小。于是, 公式(5)的噪声模型简化为公式(6)所示。

$$\sigma \approx \sqrt{\sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{readout}}^2} = \sqrt{\sigma_{\text{photon}}^2 + \sigma_{\text{dark}}^2 + \sigma_{\text{readout}}^2} = \sqrt{S + D_e \cdot t_{\text{int}} + \sigma_{\text{readout}}^2} \quad (6)$$

式中: 光子随机噪声服从泊松分布, S 为入射光电子数; D_e 为暗信号电子数; t_{int} 为积分时间。待测 CCD55-20 的暗电流为 $62e^-/\text{pixel} \cdot \text{s}^{-1}$, 读出噪声约 $9e^-$, 满阱电荷 450 Ke^- , CCD 约达到 50% 饱和时, 计算得到平均电子数约 225 Ke^- , 代入公式(6), 得到 CCD 噪声为 $\sigma \approx \sqrt{225000 + 62 \times 0.2 + 9^2} = 474e^-$, 那么由 CCD 噪声引起的不确定度为 $\varepsilon = \frac{\sigma}{\sigma_{\text{平均电子数}}} = \frac{474}{225000} \times 100\% = 0.2\%$ 。

3.4 参考探测器定标不确定度

参考探测器作为 CCD 定标过程中的辐射通量传递基准, 是影响 CCD 相对光谱响应定标精度的重要不确定度来源。系统选用低功率光电探测器作为参考探测器, 该光电探测器可追溯于 NIST 传递标准, 引用生产厂家技术手册, 可见波段范围内定标相对不确定度优于 1%。

3.5 不确定度合成

由同步采样方法和分时测量方法引起的 CCD 相对光谱响应定标不确定度分析结果如表 1 所示, 得到 CCD 同步采样方法相对光谱响应定标不确定度约 1.03%, 比分时测量方式提高了约 43%。

表 1 同步采样定标方法与分时定标方法相对定标不确定度对比分析

Tab.1 Uncertainty analysis of synchronous sampling and time-sharing measurement method

Number	Sources of uncertainty	Method of synchronous sampling	Method of time-sharing measurement
1	Time stability	-	1.5%
2	Non-synchronous sampling	0.02%	-
3	Monochromator	0.10%	0.10%
4	Reference detector	1.00%	1.00%
5	Noise	0.20%	0.20%
6	Other	0.10%	0.10%
Total uncertainty		1.03%	1.82%

4 CCD 相对光谱响应实验室定标测试

CCD 相对光谱响应定标系统示意图如图 6 所

示。待定标 CCD 放置于距离积分球出光口一定距离处,参考探测器同步采样。待定标 CCD 为 CCD55-20 系列面阵图像传感器,曝光时间 20 ms。

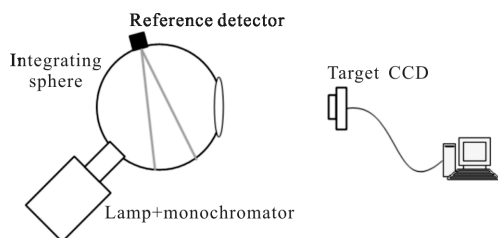


图 6 CCD 相对光谱响应定标系统示意图

Fig.6 Relative spectral response calibration system diagram of CCD

目标探测器在工作波段范围内(400~940 nm)分别采用两种定标方法进行相对光谱响应对比测试,得到 CCD 相对光谱响应对比曲线如图 7 所示。可以看出:同步采样方法测得的相对光谱曲线较平滑,说明同步采样方法削弱了光源高频抖动;与原厂数据相比标准偏差更小,说明所测数据更接近于假设真值。进而验证分析结论的准确性。

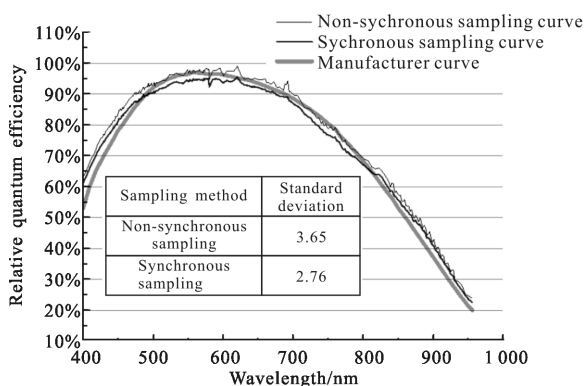


图 7 CCD 相对量子效率对比图

Fig.7 Contrast of CCD's relative quantum efficiency curve

5 结论

针对连续可调谐单色照明光源系统存在时间非稳定性的问题,提出了同步采样的定标改进方法。通过分析定标理论模型,对测量不确定度进行了分析。结果显示:由该方法获得的定标不确定度约 1.03%,

较传统的分时测量方法相比提高了约 43%。最后,分别采用两种采样方法对目标探测器进行了对比测试,证明同步采样的方法得到的相对光谱曲线更平坦,更接近于理论参考值。

参考文献:

- [1] Amico P, Bohm T. ESO's new CCD testbench [J]. *Exp Astronomym*, 1998, (8): 1-8.
- [2] Lesser M P, McCarthy B L. Quantum efficiency characterization of scientific CCDs [C]//SPIE, 1996, 2654: 278-286.
- [3] Groom D E, Bebek C J, Fabricius M, et al. Quantum efficiency characterization of LBNL CCD's [C]//SPIE, 2006, 6068: 101-111.
- [4] Steckert J. Design, implementation and setup of an automated quantum efficiency measurement system for charge-coupled devices [D]. Berkeley: Diplom Thesis, 2005.
- [5] Shao Xiaopeng, Wang Yang, Gao Peng, et al. Measurement method and setup of the quantum efficiency for charge coupled devices [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 103-106. (in Chinese)
- [6] Emva Standard 1288: Standard for characterization of image sensors and cameras [S]. European Machine Vision Association, 2010.
- [7] Zhou Lei, Zhang Junping, Zheng Xiaobing. Radiation flux calibration performed by a single chip detector [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(6): 59-62. (in Chinese)
- [8] Ya Feng, Zhou Yue, Zhang Mingchao, et al. Test equipment for relative spectral response of CCD [J]. *Spectroscopy and Spectral Analys*, 2005, 32(6): 59-62. (in Chinese)
- [9] Xu Qiuyun, Zheng Xiaobing, Li Jianjun, et al. Development of laser illuminated integrating sphere source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(4): 738-744. (in Chinese)
- [10] Wang Yong, Lv Suhong, Ma Fei, et al. Non synchronous sampling error correction system analysis [J]. *Henan Electric Power*, 2005, 3: 23-25. (in Chinese)
- [11] Holst G C. CCD Arrays, Cameras, and Displays [M]. USA: SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- [12] Li Yunfei, Li Minjie, Si Guoliang, et al. Noise analyzing and processing of TDI-CCD image sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(8): 1196-1202. (in Chinese)