

CCD 系统增益标定及不确定度评定

王洪超 刘红元 王恒飞 应承平 吴 斌

中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东, 青岛 266555

摘要 系统增益是电荷耦合器件(CCD)的重要技术参数之一,它是测定量子效率、读出噪声、满阱容量等性能参数的基础。随着成像技术的发展,精确标定 CCD 的系统增益变得越来越重要。介绍了光子转移曲线(PTC)方法标定系统增益的原理,提出利用改变光源强度的方式来获取光子转移曲线,并搭建了相关测试系统,实现了 CCD 系统增益的精确标定,得出被测器件的系统增益值为 $1.6229e^-/ADU$ 。同时还和改变曝光时间的测量方式进行了对比,两种方法的标定结果基本一致,验证了本方案的准确性。最后,对标定结果进行了不确定度评定。

关键词 光学器件; CCD 标定; 系统增益; 光子转移曲线; 不确定度

中图分类号 TN386.5 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s112004

System Gain Calibration of CCD and Evaluation of Uncertainty

Wang Hongchao Liu Hongyuan Wang Hengfei Ying Chengping Wu Bin

The 41st Research Institute of CETC, Qingdao, Shandong 266555, China

Abstract System gain is one of the important parameters of charge coupled device (CCD), from which many of the other performance parameters such as quantum efficiency, readout noise, full well CCD and so on are determined. With the development of imaging technology, accurate calibration for the system gain of CCD become more and more important. The theory of measuring system gain based on photon transfer curve technique is introduced. A method to acquire photon transfer curve by changing light intensity is proposed. At the same time, an experimental setup is constructed to calibrate system gain of CCD precisely. It is shown that the result of calibration is $1.6229e^-/ADU$ which has a good consistency with the method to obtain photon transfer curve by changing exposure time. At last, the uncertainty of this calibration is evaluated.

Key words optical devices; CCD calibration; system gain; photon transfer curve; uncertainty

OCIS codes 120.3940; 040.1240; 040.1520

1 引 言

电荷耦合器件(CCD)以其对信息表达的高灵敏度和高准确性在天文、遥感、军事、医学、安防、工业等诸多领域被广泛应用^[1-3]。在 CCD 应用系统的设计与使用当中,需要对其主要的性能指标参数进行测试和标定^[4-5],这对于成像数据分析的正确性和观测结果的真实性的真实性都有非常重要的意义。

系统增益代表了 CCD 电子学系统放大特性,是确定 CCD 器件读出噪声、量子效率、满阱容量等的重要参数,其他性能的评估也大都以它为基础。同时,系统增益的标定也便于发现 CCD 器件的一些电子学问题以及分析一些噪声来源。目前 CCD 增益的标定主要有两种方法,分别是 X 射线法和光子转移曲线法。X 射线法需要相应的放射源,其应用受到一定的局限性,国外较多采用这种方法^[6-7],国内曾智蓉等^[8]也采用 Fe^{55} 放射源对 CCD 增益进行了标定。光子转移曲线是在均匀光照射时,CCD 不同响应值下的信号-方差曲线,一般是通过改变 CCD 器件的曝光时间来获得,由于其简单易行、准确度高而得到越来越广泛的使用^[1,9]。F Christen 等^[11]利用欧洲南方天文台的装置对时间延迟积分(TDI) CCD 相机进行了标定,他们基于标准光

收稿日期: 2015-01-15; 收到修改稿日期: 2015-03-09

基金项目: “十二五”计量技术基础科研项目(J312012A003)

作者简介: 王洪超(1988—),男,硕士,工程师,主要从事光电子计量方面的研究。E-mail: whc5619313@163.com

子转移曲线方法,采用了一种简单快捷的处理方式,只需要获取 2 张 TDI CCD 图像即可实现。M Downing 等^[12-13]研究了光子转移曲线的非线性效应,通过空间自相关分析得出非线性现象是由于 CCD 成像区域内像素间的电荷扩散造成的。国内张惠鸽等^[14-15]也采用该方法实现了对 CCD 增益的标定。

光子转移曲线法对光源均匀性的要求较高,同时光子转移曲线一般是通过不断改变 CCD 器件的曝光时间来获得。本文提出通过连续改变光源的强度的方式来获取光子转移曲线,并搭建了相关测试系统,进而完成了 CCD 系统增益的标定。采用的方法数据量小,计算方便,同时和改变曝光时间的方式进行了对比,两种方法达到了很好的一致性,最后对标定结果进行了不确定度评定。

2 系统增益标定原理

2.1 系统增益的定义

光子入射到 CCD 光敏面上就会有光生电子,而 CCD 的输出是以数字计数值来表征,所以就引入了系统增益的概念,其定义为 CCD 一个模数转换单位(ADU)对应的原始光生电子数,单位为 e^-/ADU ^[7]。例如,增益值为 $1.8 e^-/\text{ADU}$ 的芯片代表每 1.8 个电子产生相机的一个计数单位。当然,电子数并不能是小数,以上数值的实际含义是每 4/5 的时间内 2 个电子产生一个计数单位,每 1/5 的时间内,1 个电子产生一个计数单位。该数值是基于大量数据的一个平均转换率。较大的系统增益可以让 CCD 在线性区内有一个较大的动态范围,但同时也容易引入较大的数字噪声。

2.2 噪声模型及光子转移曲线

由于光子并不是按照均匀等间隔的入射到 CCD 芯片上,而是呈现一定的随机性和不规则性。单位时间内入射的光子数可以用泊松分布来表示。每一个入射的光子都有一定几率激发光电子,因此激发的光电子数 μ_e 也同样服从泊松分布:

$$\sigma_e^2 = \mu_e. \quad (1)$$

CCD 的输出数字信号 μ_y 是光生电子和暗噪声共同被放大后的和:

$$\mu_y = \frac{1}{K}(\mu_e + \mu_d), \quad \mu_y - \mu_{y, \text{dark}} = \frac{1}{K}\mu_e, \quad (2)$$

其中 μ_d 是在无光照条件下产生的电子数, $\mu_{y, \text{dark}} = \frac{1}{K}\mu_d$ 为其对应的 CCD 数字值。

设总的数字信号值的暗噪声方差为 σ_y^2 , 假定所有的噪声能够线性叠加,则根据误差传递公式可得

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{K^2}(\sigma_d^2 + \sigma_e^2) + \sigma_q^2, \quad (3)$$

其中 σ_d^2 为 CCD 芯片读出电路和放大电路引起的噪声方差, σ_q^2 为后端模数转换引起的噪声方差; σ_e^2 为光生电子造成的 CCD 信号波动方差。

由(1)~(3)式可知:

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{K^2}\sigma_d^2 + \sigma_q^2 + \frac{1}{K}(\mu_y - \mu_{y, \text{dark}}), \quad (4)$$

即

$$\frac{1}{K} = \frac{\sigma_y^2 - \sigma_{y, \text{dark}}^2}{\mu_y - \mu_{y, \text{dark}}}. \quad (5)$$

由(5)式可以看出,如果以 $\mu_y - \mu_{y, \text{dark}}$ 为横坐标。以 $\sigma_y^2 - \sigma_{y, \text{dark}}^2$ 为纵坐标,就可以得出 CCD 在不同响应值下的信号一方差曲线,所获得的曲线即是 CCD 的光子转移曲线,作它们的线性拟合,其斜率的倒数正是 CCD 的系统增益 K 。这就是用光子转移曲线测试 CCD 系统增益原理的由来。

3 CCD 系统增益标定实验

3.1 实验装置

如图 1 为 CCD 增益标定装置的总体结构图,整套装置由单色仪、积分球、被测 CCD 及驱动电路、三维位移台、主控计算机构成。光源采用 500 W 氙灯,单色仪采用 Zolix Omni- λ 180i 系列光栅单色仪(第一块光栅

1200 g/mm@300 nm, 第二块光栅 600 g/mm@750 nm), 可在 300~1500 nm 的光谱波段内任意调节。单色仪狭缝配有驱动电机, 可以通过计算机程控调节, 调节范围为 0.01~3 mm, 以便控制进入积分球内的光能量。单色仪出口狭缝处安装滤光片轮, 可以将二级以上的光谱滤掉。均匀面光源的产生通过积分球获得, 球体直径为 50 cm, 输出口直径为 10 cm, 内部采用进口硫酸钡材料, 其反射率达到 98% 以上, 保证在出光口处能达到优于 1% 的非均匀性; 被测器件被固定于三维位移台上, 计算机可通过控制器调节位移台来决定被测器件的位置。实验采用北京微视图像公司生产的 MVC2900 千兆网相机作为被测器件, 像素数 1392×1400, 像素尺寸为 6.45 μm×6.45 μm 相机的采样位数为 14 bit。同时, 为保证测试精度, 该装置配套有专用暗室排除杂散光的影响。

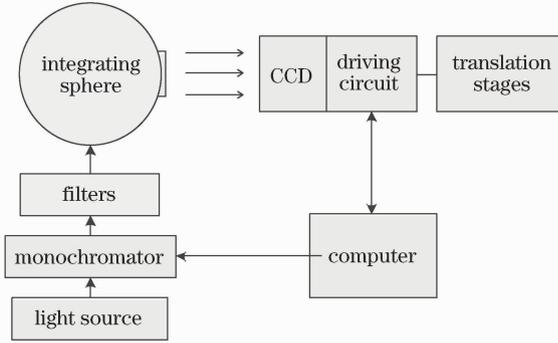


图 1 CCD 系统增益标定装置图

Fig. 1 Experimental setup of CCD system gain calibration

按照如图所示连接好设备, 调整位移台, 使被测 CCD 器件正对积分球出光口。由于积分球出口不同距离处其均匀性会有所不同, 一般在积分球出光口处以及 4~5 倍的积分球出光口径之外均匀性较好^[16], 在此为充分利用光能量, 选择在积分球出光口处进行系统增益的标定。

3.2 实验步骤

测试时, 将单色仪设置为某一波长值并待其稳定一段时间。首先进行暗场图的获取, 暗场图是在一定“曝光时间”下没有光信号输入的图像, 主要包含暗电流噪声和读出噪声。获取时关闭单色仪快门, 通过被测 CCD 器件采集暗场图, 为了排除环境等因素的影响, 在此通连续采集 5 张暗场图, 选取其中较好的两张计算平均灰度值 $\mu_{y, \text{dark}}$ 和方差 $\sigma_{y, \text{dark}}^2$ 。

打开单色仪快门, 从小到大依次设置不同的单色仪狭缝宽度, 采集稳定均匀光源照射下的一系列平场图像, 直至 CCD 达到饱和为止。为保证测试精度并排除其他不确定因素的影响, 每次采集都应保证大于 5 张图像, 并选取其中两张计算每组平场图的平均灰度值 μ_y 和方差 σ_y^2 。

以 $\mu_y - \mu_{y, \text{dark}}$ 作为横坐标, 以 $\sigma_y^2 - \sigma_{y, \text{dark}}^2$ 作为纵坐标描点, 获得的曲线即是该 CCD 器件的光子转移曲线, 由于光子转移曲线会存在一定的非线性效应^[12-13], 为了消除非线性效应的影响, 使标定结果更精确, 所以在此选取曝光量在饱和值 70% 以下的点进行最小二乘直线拟合。

3.3 实验数据处理及结果

实验中由于采取了改变光源强度的方式来获取不同响应值下的 CCD 图像, 所以 CCD 相机的曝光时间设置为固定值 0.05s。考虑到平场图像在边缘处的输出值有所降低, 为了获得均匀的实验数据, 提高实验的准确性, 计算时选择了 CCD 成像光敏面中间 600×400 的子阵列作为统计区域。平均灰度值和方差的计算方法见(6)式和(7)式。其中 μ 和 σ^2 为图像的平均灰度值和方差; μ_1 和 μ_2 分别代表选取的两张图像, M 、 N 分别为获取图像的行像素数和列像素数; 通常情况下, 方差的计算需要获取足够数量的图像, 但是, 假定噪声是相对不变且空间均匀分布的, 在此以两幅图像进行计算方差, 同时采用两幅图像相减的方式还能有效的消除 CCD 空间非均匀性的影响^[6]

$$\mu = \frac{1}{2MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (\mu_1[m][n] + \mu_2[m][n]), \quad (6)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{2MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (\mu_1[m][n] - \mu_2[m][n])^2. \quad (7)$$

单色仪的波长设置为 600 nm。按照 3.2 节所述步骤得到该 CCD 器件的光子转移曲线,如图 2 所示,选取曝光量为 70%以下的点进行拟合计算,由拟合直线斜率的倒数得出被测器件的系统增益值。为了验证该方案的准确性,还通过连续改变曝光时间的方式对该相机同样情况下的系统增益进行了标定测试,每种方式均进行了 6 次实验并计算标准偏差,具体的实验结果见表 1。由表 1 可以看出,通过改变光强的方式测得相机的系统增益平均值为 1.6229e-/ADU。而通过改变曝光时间的方法测得的相机系统增益平均值为 1.6274 e-/ADU.,与实验结果基本一致。改变光强的方式只需要获取一次暗场图,数据量小,计算简单,同时,在实际的测试中,如果 CCD 器件的曝光时间不能灵活的设置,使用改变光强的方式来标定系统增益是个不错的选择。

表 1 CCD 系统增益标定结果
Table 1 Experimental results of CCD system gain calibration

	1	2	3	4	5	6	Average	Standard deviation/%
Change light intensity	1.6252	1.6183	1.6258	1.6163	1.6269	1.6248	1.6229	0.27
Change exposure time	1.6262	1.6339	1.6175	1.6235	1.6232	1.6398	1.6274	0.50

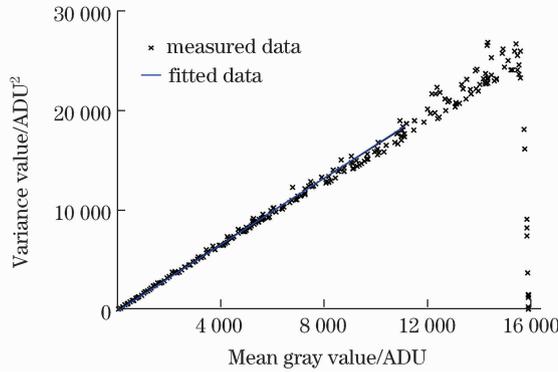


图 2 被测 CCD 的光子转移曲线
Fig. 2 Photon transfer curve of the tested CCD

4 不确定度评定

4.1 不确定度分量的评定

根据 CCD 器件系统增益计算公式,考虑校准装置各个组成部分,以及校准过程中人员、环境等各个因素对测试结果的影响,CCD 器件系统增益标定不确定度来源主要有以下几个方面构成:

1)测量重复性引入的标准不确定度 u_1

用 A 类方法进行评定。在相同条件下对 CCD 的系统增益重复测量 6 次,见表 1,根据贝塞尔公式计算得到单次测量的相对标准偏差为 0.27%。最终的 CCD 系统增益值由 6 次测量的算术平均值得到,故测量重复性引入的标准不确定度分量用下式计算得到

$$u_1 = \frac{0.27\%}{\sqrt{6}} = 0.11\% \tag{8}$$

2)光源稳定性引入的标准不确定度

用 B 类方法进行评定。采用单元探测器对装置中的“单色仪+积分球”辐射稳定性进行测试,测试时间 30 min,每隔 1 s 从单元探测器采集输出信号一次,连续测试 6 次,测量结果如表 2 所示。

表 2 单色仪和积分球辐射稳定性测试结果
Table 2 Radiation stability of monochromator and integrating sphere

	1	2	3	4	5	6	Average
Stability	0.38%	0.36%	0.39%	0.36%	0.38%	0.38%	0.38%

CCD 器件系统增益的校准在较短时间内完成,因此由积分球辐射稳定性引入的不确定度分量最大为 $u_2 = 0.38\%$ 。

3) 积分球均匀性引入的不确定度

用 B 类方法进行评定。利用点探测器扫描法对装置中的“单色仪+积分球”紧贴出光口处的辐射非均匀性测试结果为 0.90%。在本实验中,出光口的直径为 10 cm,而被测器件的尺寸为 2/3 inch(1 inch = 2.54 cm),其面积和积分球出光口面积相比非常小,利用其对角线长度和积分球口径的面积相比得出相对离心率为 $9\text{ mm}/120\text{ mm} = 0.075$,在该相对离心率数值下被测器件表面非均匀性可以达到非常小的水平^[16-17],同时采用两幅图像相减的数据处理方式也在一定程度上消除了非均匀性带来的影响,因此,保守估计由积分球辐射非均匀性引入的不确定度分量最大为 $u_3 = 0.20\%$ 。

4) 其他因素引入的不确定度

除了上述不确定度来源以外,对测量结果有影响的因素有:数据处理引入的不确定度、被测器件的线性度以及校准过程中人员、环境等各个因素对测试结果的影响,这些影响比较小,在此估计为 $u_4 = 0.05\%$ 。

4.2 计算合成标准不确定度

以上各不确定度的来源不同,即引入各不确定度分量的因素互不相关,相关系数为零,因此合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = \sqrt{(0.11\%)^2 + (0.38\%)^2 + (0.20\%)^2 + (0.05\%)^2} = 0.45\% \quad (9)$$

4.3 确定扩展不确定度

假定每个分量接近正态分布,取 95% 的置信水平,则取包含因子 $k=2$,那么扩展不确定度为:

$$U = ku_c = 2 \times 0.45\% = 0.90\% \quad (10)$$

5 结 论

针对 CCD 器件系统增益的定标需求。基于光子转移曲线法实现了 CCD 器件系统增益的标定。在分析了光子转移曲线原理的基础上,搭建了相关的测试系统。采用积分球获得均匀面光源,通过连续改变光源的强度来获取光子转移曲线,得到被测器件的系统增益值为 $1.6229e^-/ADU$,并和改变曝光时间的方式进行了对比,两种方法达到了很好的一致性。采用改变光源强度的方法标定系统增益数据量小,计算简单,同时解决了某些 CCD 器件曝光时间不能灵活设置的带来的不便,最终的不确定度评定结果为 0.90%。本文的工作为量子效率等参数的高精度测试以及 CCD 性能综合评价奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 J R Janesick. Scientific Charge-Coupled Devices [M]. Bellingham: SPIE Press, 2001.
- 2 Xu Xinhang, Chen Ning, Wang Bing, *et al.*. Design of compact middle-wave infrared camera used on airborne platform[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0816002.
- 3 徐新行, 陈 宁, 王 兵, 等. 机载紧凑型中波红外相机的设计[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0816002.
- 4 Ma Xiaomin, Tao Zongming, Ma Mingjun, *et al.*. Retrieval method of side-scatter lidar signal based on charge coupled device technique[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0201001.
- 5 麻晓敏, 陶宗明, 马明俊, 等. 基于 CCD 的侧向散射激光雷达信号提取方法[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0201001.
- 6 Xiu Jihong, Huang Pu, Li Jun, *et al.*. Non-uniformity correction of large area array color CCD aerial mapping camera[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0711003.
- 7 修吉宏, 黄 浦, 李 军, 等. 大面阵彩色 CCD 航测相机成像非均匀性校正[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0711003.
- 8 Yu Da, Zhou Huaide, Long Kehui, *et al.*. Screening and testing method for area CCD[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0708001.
- 9 余 达, 周怀得, 龙科慧, 等. 一种面阵 CCD 的筛选测试方法[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0708001.
- 10 J C Romero. Characterization Techniques for Scientific Charge-Couple Devices[R]. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona, 2007.
- 11 T Sakao, R Kano, H Hara, *et al.*. Focal plane CCD camera for the X-Ray Telescope (XRT) aboard SOLAR-B[J]. SPIE, 2004, 5487: 1189-1198.
- 12 Zeng Zhirong, Li Baoquan, Peng Jilong. Gain calibration of an astronomical CCD using Fe⁵⁵[J]. Astronomical Research & Technology, 2010, 7(1): 65-71.
- 13 曾智蓉, 李保权, 彭吉龙. 空间应用短波 CCD 系统增益的放射源标定和估算[J]. 天文研究与技术, 2010, 7(1): 65-71.
- 14 T P Prabu, Y D Mayya, G C Anupama. Gain calibration of CCD systems at VBO [J]. Journal of Astrophysics and Astronomy, 1992, 13: 129-144.
- 15 F. Dierks. Sensitivity and Image Quality of Digital Cameras[EB/OL]. [2015/06/10] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.85.7059&rep=rep1&type=pdf>.
- 16 F Christen, K Kuijken, D Baade, *et al.*. Fast Conversion Factor (gain) Measurement of a CCD Using Images with Vertical Gradient[M]. Scientific Detectors for Astronomy 2005; Explorers of the Photon Odyssey, 2006: 537-542.
- 17 M Downing, D Baade, P Sinclair, *et al.*. CCD riddle: a) signal vs time: linear; b) signal vs variance: non-linear[C]. SPIE, 2006, 6276:

627609.

- 13 M Downing, P Sinclair. The ccd riddle revisted; signal versus time linear signal versus variance non-linear[C]. Proc. SDW, 2013.
- 14 Zhang Huige, Bai Lixin, Zhang Wende. Calibration of system gain for optical CCD system in ICF[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2007(4):759-763.
张惠鸽,白立新,张文德. 用于 ICF 的光学 CCD 系统增益的标定研究[J]. 核电子学与探测技术, 2007(4):759-763.
- 15 Liu Yaxia, Bao Haiming, Li Jie, *et al.* Measuring the system gain of the TDI CCD remote sensing camera[C]. SPIE, 2005, 5633:520-526.
- 16 Labsphere. A Guide to Integrating Sphere Theory and Applications[EB/OL]. [2015/06/10] <https://www.labsphere.com/wp-content/uploads/2015/02/a-guide-to-integrating-sphere-theory-and-applications.pdf>.
- 17 全国法制计量管理计量技术委员会. JJF 1059.1—2012, 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 中国质检出版社, 2013.

栏目编辑: 韩 峰