

文章编号:1002-2082(2015)02-0253-06

# 可见光光电成像系统整机综合参数校准技术研究

杨 红,康登魁,姜昌录,王 雷,郭 羽,马世帮

(西安应用光学研究所,陕西 西安 710065)

**摘 要:**为了准确、客观地评价可见光光电成像系统整机性能参数,研制了可见光光电成像系统整机综合参数校准装置。装置由积分球光源系统、标准测试卡、光学准直系统、支撑调整台、视频数据采集模块和综合处理软件等几部分组成,主要完成系统分辨力、调制传递函数(MTF)、对比度、噪声功率谱、噪声等效亮度、灵敏度等性能参数的测量。针对某型号可见光电视产品,验证了装置的有效性,给出了综合参数的测量结果,其截止频率为  $39.4 \text{ mm}^{-1}$ ,对比度为 76.5%,均方根噪声电压为 2.14 mV,噪声等效亮度(NEL)为  $0.0455 \text{ cd/m}^2$ ,信号传递函数对应的灵敏度为  $47 \text{ mV} \cdot (\text{cd/m}^2)^{-1}$ 。最后,分别采用照度计和标准视频发生器对装置进行了标定,其积分球光源出口亮度和信号采集系统输出电压最大相对测量误差分别为  $-2.3\%$  及  $1\%$ 。

**关键词:**可见光;光电成像系统;调制传递函数;噪声;灵敏度

中图分类号:TN206

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201536.0203003

## Calibration for integrated parameters of visible photoelectric imaging system

Yang Hong, Kang Dengkui, Jiang Changlu, Wang Lei, Guo Yu, Ma Shibang

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Key words:** In order to evaluate the integrated properties of visible photoelectric imaging system exactly and objectively, the calibration equipment was developed. The equipment was composed of integrating sphere, standard card, off-axis reflective collimator, mechanical adjustment bench, video acquisition module and comprehensive software. It could complete a measurement of resolution, contrast, optical transfer function(MTF), noise power spectrum, noise equivalent light and sensitivity. For a certain visible photoelectric imaging product, the effectiveness of the equipment was proved. The comprehensive parameter measurements are given: the cut-off frequency is  $39.4 \text{ mm}^{-1}$ , the contrast is 76.5%, the root-mean-square (RMS) noise is 2.14 mV, the noise equivalent light(NEL) is  $0.0455 \text{ cd/m}^2$  and the sensitivity is  $47 \text{ mV} \cdot (\text{cd/m}^2)^{-1}$ . In addition, an illuminometer and a standard video pattern generator were respectively adopted for making calibration, results show that the maximum relative measurement errors of integrating sphere and the signal acquisition system are  $-2.3\%$  and  $1\%$ .

**Key words:** visible; photoelectric imaging system; MTF; noise; sensitivity

## 引言

可见光光电成像系统是构成光电精密跟踪和瞄准的关键设备之一,其性能的优劣不仅取决于

光学系统成像性能、CCD 成像器件的性能,还与光学系统与 CCD 的匹配、电子处理电路、转化精度(如图象识别精度、图像匹配精度)有关。可见光

收稿日期:2014-10-19; 修回日期:2014-11-26

作者简介:杨红(1960—),女,吉林长春人,研究员,主要从事光学设计、光学计量及测试研究工作。E-mail: yphoon@163.com

光电成像系统整机的性能参数主要有分辨力、对比度、调制传递函数(MTF)、噪声功率谱、噪声等效亮度及灵敏度等参数。国内外对于光学成像系统的测量评价技术已经开展了大量的研究,美国 OPTIKOS 公司、德国 TROPTIC、ZEISS 公司等均推出了针对视场、焦距、光学传递函数、噪声等参数的测试仪器。德国技术物理研究院(PTB)、英国国家物理实验室(NPL)以及美国标准技术研究院(NIST)开展了光电成像系统的上述参数的溯源、校准工作。在国内许多单位都建立了基于光学传递函数的光学系统像质评价装置,但是,以上研究只是针对光学系统的成像性能展开评价,并没有考虑到探测器以及后续电路处理的影响<sup>[1-7]</sup>。随着光电技术的发展,特别是武器系统的升级换代,对光电系统整机综合性能的校准提出了越来越高的要求。基于上述分析,开展了可见光光电成像系统整机综合参数校准技术研究,建立了相应的校准装置,对分辨力、对比度、调制传递函数(MTF)、噪声功率谱、灵敏度等参数展开校准/检测。

## 1 实验装置与原理

校准装置如图 1 所示,由积分球光源系统、标准测试卡、光学准直系统、被测系统支撑调整座、视频图像采集模块、测量与控制软件包等几部分组成。标准测试卡安装在高精度准直光学系统的焦面上,通过积分球系统均匀照明,模拟无穷远的测试目标。视频图像采集模块采集被测样品的图像并输入综合处理软件,完成光电成像系统综合参数的测量。

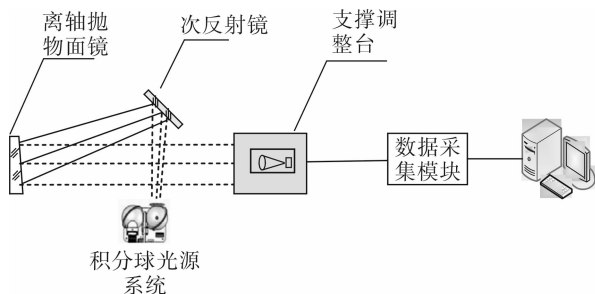


图 1 测量装置原理图

Fig. 1 Principle diagram of measurement equipment

图 1 中,光源系统采用双积分球结构,积分球直径为 200 mm,出口直径为 50 mm,出口均匀性为 95%,光源亮度的动态范围为  $10^6$  ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ),通过 8 个尺寸不等的孔径光阑和一个电动衰减片可以完成光源系统的连续调光,其结构如图 2 所示。

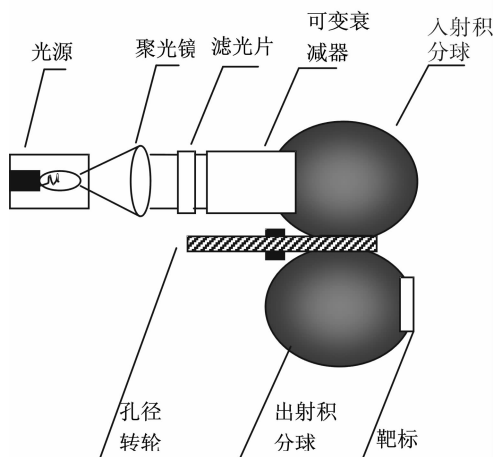


图 2 积分球光源系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of integrating sphere system

离轴抛物面镜的焦距为 2 036 mm,离轴量为 230 mm,面形优于  $0.1\lambda$  ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ )。支撑调整台为六维调节机构,安装在光学平台上,由横滚调节机构、俯仰调节机构、方位调节机构、升降调节机构、横行平移机构和视场调节机构等组成。数据采集模块主要针对当前常用的标准模拟视频接口模式和 Cameralink 视频接口模式,通过图像采集卡将视频信号输入综合处理软件,完成对分辨力、对比度、调制传递函数(MTF)、噪声功率谱、灵敏度等多参数的测量。

## 2 实验结果与分析

针对某型号可见光电视探测系统进行了分辨率、光学传递函数、噪声功率谱及信号传递函数的测量。

### 2.1 分辨力测量

可见光光电系统的分辨力测量采用主观测量法。将标准分辨力靶标安装于光学准直系统的焦面处,可见光光电系统与光学准直系统对准后观测分辨力图像。人眼主观判断能够分辨的分辨力图案获得光电系统的分辨力。

在分辨率测量中,采用 WT1005-62 型标准分辨率板第 5 号,测量结果如图 3 所示,其分辨单元数为 13。

按表可以查出线对数  $N_0$  为  $6.25 \text{ mm}^{-1}$ ,按下式计算出系统的分辨率:

$$N = N_0 \frac{f'_0}{f'} (\text{mm}^{-1}) = 6.25 \times \frac{2\,036}{320} = 39.8 (\text{mm}^{-1}) \quad (1)$$

式中:  $f'_0$  为准直系统的焦距;  $f'$  为被测系统的焦距。

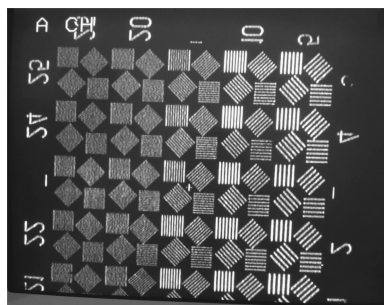


图3 分辨率测量结果图

Fig. 3 Resolution measurement result

## 2.2 对比度测量

对比度定义采用调制对比度的概念,将包含黑白对比度目标的物理图像采集进入计算机,通过数字图像处理的方法,确定出目标与背景的对比度情况。测量局部对比度时,可以分别测得“暗背景”和“目标”上某一部分的灰度值,并分别算出矩形框内的平均灰度。调制对比度如下:

$$M = \frac{L_m - L_b}{L_m + L_b} = \frac{E_m - E_b}{E_m + E_b} = \frac{m - b}{m + b} \quad (2)$$

式中:  $M$  为调制对比度;  $L_m$  为目标的亮度;  $L_b$  为背景的亮度;  $E_m$  和  $E_b$  分别为 CCD 像面上目标和背景对应的照度;  $m$  和  $b$  分别是由图像中目标和背景的测量区域中计算出的灰度值。在输入亮度为  $8.5 \text{ cd/m}^2$  的条件下进行了对比度测量,测量结果如图 4 所示。



图4 对比度测量结果图

Fig. 4 Contrast measurement result

采用图像分割处理技术,分别计算出目标亮区域和背景暗区域的灰度值,根据公式计算出该亮度值下的对比度:

$$M = \frac{m - b}{m + b} = \frac{210 - 28}{210 + 28} \times 100\% \approx 76.5\% \quad (4)$$

## 2.3 光学传递函数测量

采用斜狭缝法可以解决光学传递函数测量中空间频率混叠和欠采样的问题。光学传递函数表达式为

$$OTF(f_x) = \frac{\Delta u}{D} \sum_{k=0}^{N-1} LSF(u_k) \exp(-2\pi j f_x u_k) = MTF(f_x) \exp[-j PTF(f_x)] \quad (5)$$

式中  $D$  表示  $LSF(u)$  曲线下的面积。  $MTF(f_x)$  和  $PTF(f_x)$  可按下式计算:

$$MTF(f_x) = \frac{1}{D} \sqrt{C^2(f_x) + S^2(f_x)} \quad (6)$$

$$PTF(f_x) = \arctan[S(f_x)/C(f_x)] \quad (7)$$

式中:  $MTF$  为调制传递函数;  $PTF$  为相位传递函数;  $C(f_x)$  和  $S(f_x)$  分别对应  $OTF$  的实部和虚部。

计算过程:沿 CCD 的每一行进行 LSF 采样,然后根据垂直方向上的质心进行对准和匹配,针对重建后的 LSF 再进行傅里叶变换,即可得到光学传递函数,该方法可提高测量系统的采样率。

在 MTF 测量过程中,狭缝宽度为  $50 \mu\text{m}$ ,其对应的截止频率为  $40 \text{ mm}^{-1}$ ,采集卡系统像素对应的截止频率可以通过下式进行计算:

$$f_{\text{cut}} = \frac{1}{2 \times FGB_{\text{pixel}}} = \frac{1}{2 \times EAL/1024} \quad (8)$$

式中:  $FGB_{\text{pixel}}$  为图像处理系统的像元尺寸;  $EAL$  为系统的等效放大率。MTF 计算的截止频率应为上述 2 个频率的较小值。针对本装置,采用四杆靶对系统等效放大率进行了标定,其值为 13,则  $f_{\text{cut}} = 39.4 \text{ mm}^{-1}$ 。该系统的截止频率只能达到  $39.4 \text{ mm}^{-1}$ 。LSF 和 MTF 的测量结果如图 5 和图 6 所示。

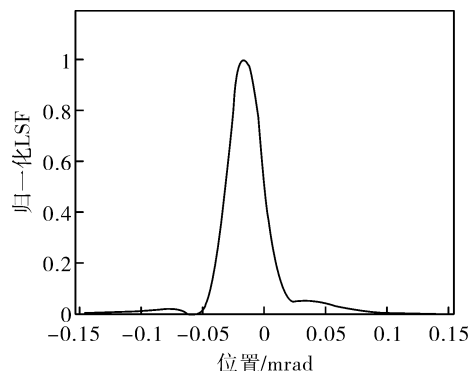


图5 LSF 测量曲线

Fig. 5 LSF measurement result

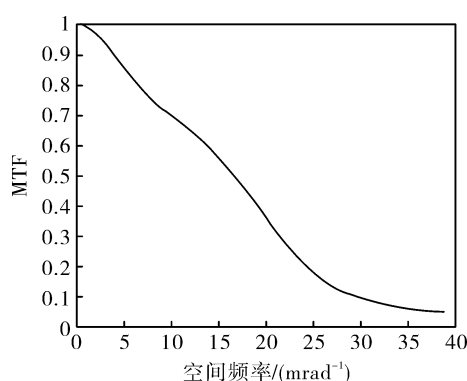


图 6 MTF 测量曲线

Fig. 6 MTF measurement result

## 2.4 噪声功率谱测量

对于光电成像系统,噪声通常包括时间域噪声和空间域噪声。时间域噪声泛指诸如辐射噪声、温度噪声、热噪声、散粒噪声、产生-复合噪声以及  $1/f$  噪声等常见的基本噪声,空间域噪声为  $t$  时刻空间域均值为零的噪声<sup>[8]</sup>。实际测量时,在背景图案中选择适当的积分区域,通过综合处理软件可以自动拟合出噪声功率谱曲线,并给出均方根噪声、噪声等效亮度等相关数值。

噪声功率谱的曲线如图 7 所示,选择的像素数为 169,积分时间为 0.04 s,经过计算,其均方根噪声电压为 2.14 mV,噪声等效亮度(NEL)为 0.045 5  $\text{cd}/\text{m}^2$ 。

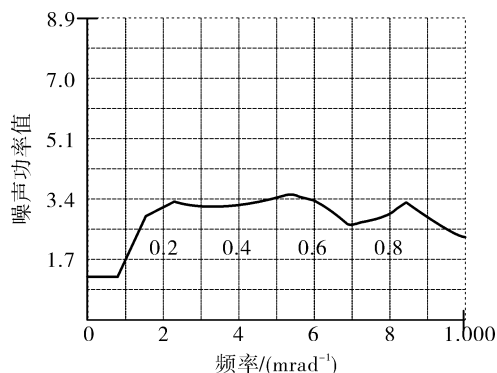


图 7 噪声功率谱测量曲线

Fig. 7 NPS measurement curve

## 2.5 信号传递函数测量

SiTF 是响应度函数(响应度函数是典型的 S 型曲线)线性部分的斜率,实际测试中测试的是响应度函数。实际测量时,首先调节积分球光源系统的亮度值,找出光电系统可探测的最小和最大亮度值,再在其变化范围内均匀设置一定的测量

点数,最后通过拟合,计算出响应度函数。

在信号传递函数测量过程中,最大亮度值为  $6 \text{ cd}/\text{m}^2$ ,最小亮度为  $1 \text{ cd}/\text{m}^2$ ,测量点数为 15,其测量结果如图 8 所示,图中对线性部分进行了线性拟合。它在各个测量点上的测量值如表 1 所示。根据公式  $S = \frac{RMS_{noise}}{REL}$  可以计算出信号传递函数的灵敏度  $S$  为  $47 \text{ mV} \cdot (\text{cd}/\text{m}^2)^{-1}$ 。

表 1 信号传递函数各点测量值

Fig. 1 Measurement result of SiTF

测量 点数	输入亮度 值/ $(\text{cd}/\text{m}^2)$	输出电压 值/mV	测量 点数	输入亮度 值/ $(\text{cd}/\text{m}^2)$	输出电压 值/mV
1	1.009	172.184	9	3.790	454.012
2	1.376	216.295	10	4.146	472.688
3	1.742	262.244	11	4.503	495.432
4	2.111	302.005	12	4.867	512.516
5	2.479	346.060	13	5.215	529.555
6	2.720	366.734	14	5.560	542.581
7	3.083	399.053	15	5.909	555.658
8	3.431	427.069			

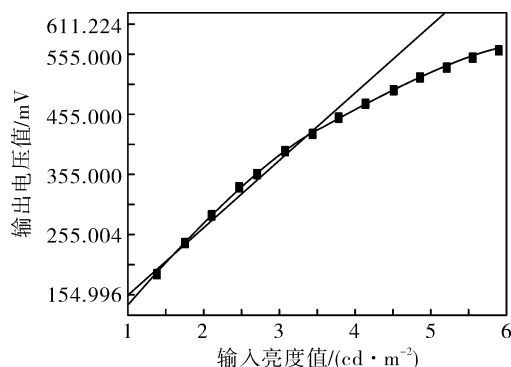


图 8 信号传递函数拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of SiTF

## 3 系统的标定

### 3.1 光源系统的标定

采用照度计对积分球出口的照度均匀度进行标定。测试步骤如下:1)将照度计探头对准出光口,探头光接收面与积分球开口内壁齐平,避免积分球开口墙壁挡住入射到照度计探头的光;2)在出口照度值为  $10^3$ 、 $10^2$ 、 $10^1$ 、 $10^0$ 、 $10^{-1}$ 、 $10^{-2} \text{ lx}$  量级时,读取每次测量值,测量结果如表 2 所示,其最大相对误差为  $-2.3\%$ 。

表2 积分球光源亮度标定值

Table 2 Luminance calibration of integrating sphere

标称值 /(cd/m <sup>2</sup> )	实测值 /(cd/m <sup>2</sup> )	相对测量 误差/%
2000	1954.0	-2.3
1000	981.9	-1.9
300	304.8	1.6
100	100.8	0.8
30	30.5	1.
10	10.1	1
3	3.02	0.67
1	1.003	0.3
0.1	0.102	2.0
0.05	0.051	2.0

### 3.2 视频采集系统的标定

采用彩色视频图像发生器(Model 2225)对视频采集系统进行标定。视频输出格式满足 RS-170 及 CCIR,视频白电平和黑电平分别为 1000 mV 和 0 mV。其标定过程为:视频发生器在白电平和黑电平之间选择 17 档,分别测量其输出电压,从而计算出其误差值,测量结果如表 3 所示,最大相对测量误差为 1.00%<sup>[9-11]</sup>。

表3 视频采集系统的标定结果

Table 3 Calibration of video acquisition system

序数	标称值/mV	测量值/mV	相对测量误差/%
1	0.0	3.9	—
2	44.6	44.3	-0.67
3	89.3	88.4	-1.00
4	133.9	133.7	-0.15
5	178.5	177.9	-0.34
6	223.1	222.2	-0.40
7	267.8	267.3	-0.19
8	312.4	312.8	0.13
9	357.0	357.8	0.22
10	401.6	403.1	0.37
11	446.3	448.1	0.40
12	490.3	492.6	0.47
13	535.5	537.1	0.30
14	580.1	581.9	0.31
15	624.8	627.9	0.50
16	669.4	672.9	0.52
17	714.0	718.2	0.59

## 4 结论

研制的可见光光电成像系统综合参数校准装置主要用于可见光光电系统整机多项参数的测试和校准。整套系统装置实现了分辨力、光学传递函数、对比度、噪声功率谱及信号传递函数等多参数的综合校准。通过实验验证了该套装置的有效性,并采用照度计及标准信号发生器对积分球光源和信号采集系统进行了标定,最大相对误差分别为-2.3%和1%。随着机载、车载以及舰载的各类搜索、跟踪及瞄准武器系统可见光光电成像系统的广泛应用,该装置可以提高系统的校准/检测效率,为可见光光电成像系统设计、装配和性能提升提供计量保障。

### 参考文献:

- [1] Su Datu, Shen Hailong, Chen Jinbang. Optical measurement and image evaluation[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1988.  
苏大图, 沈海龙, 陈进榜. 光学测量与像质鉴定[M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1988.
- [2] Zhu Xiangzhu, Zhang Jianhui. The characteristic of optical transfer function[J]. Journal of ShaoYang University: Natural Science, 2005, 2(2): 18-20.  
朱湘柱, 张建辉. 光学传递函数的特性研究[J]. 邵阳学院学报: 自然科学版, 2005, 2(2): 18-20.
- [3] Fei Xiang, Ni Xuxiang. Present status and development trend of OTF testing instrument[J]. Optical Instruments, 2003, 25(2): 48-52.  
樊翔, 倪旭翔. 光学传递函数测试仪的现状和发展趋势[J]. 光学仪器, 2003, 25(2): 48-52.
- [4] Jiao Mingyin, Feng Zhuoxiang. Digital Fourier analysis method for measuring the optical MTF of an IR imaging scanner[J]. SPIE, 4221: 248-251
- [5] State bureau of Technical Supervision. GB/T 13742-2009/ISO 11421:1997. Accuracy of optical transfer function (OTF) measurement [S]. Beijing, China Standard Publishing House, 2009.  
国家技术监督局. GB/T 13742-2009/ISO 11421: 1997. 光学传递函数测量准确度[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009
- [6] Yang Hong. The calibration of optical transfer function equipment of large aperture in infrared and visible band[J]. Optical Technique, 2001, 27(1): 87-94  
杨红. 大口径可见光到红外波段光学传递函数测试仪的标定[J]. 光学技术, 2001, 27(1): 87-94.

- [7] Ma Weihong, Ma Zhen, He Li, et al. Influcny of spatial frequency calibration on OTF test percision [J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 2004, 24(2):144-147.  
马卫红,马臻,贺丽,等. 光学传递函数测试及空间频率标定方法[J]. 西安工业学院学报,2004,24(2):144-147.
- [8] Zhang Wei, Wang Yuefeng, Dong Wei. Testing of the power spectrum of image intensifier[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2003,23(2):621-622.  
张伟,汪岳峰,董伟. 微光像增强器噪声功率谱测试研究[J]. 光谱学与光谱分析,2003,23(2):621-622.
- [9] Chen Liping, Su Hongyu, Yang Jiebin. Standard calibration equipments for television imaging sensors [J]. China Measurement & Test, 2009, 35(5): 77-80.  
陈丽萍,苏红雨,杨杰斌,等. 电视图像传感器检测平台的研制[J]. 中国测试,2009,35(5):77-80.
- [10] Greivenkamp J E, Lowman A E. Modulation transfer function measurement of sparse-array sensors using a self-calibrating fringe pattern [J]. Applied Optics, 1994, 33 (22): 5029-5036.
- [11] Boreman G. Transfer function in optical and electro-optical systems[M]. USA: SPIE Press, 2001.