

# 一种基于针孔像分析的光学系统调制传递函数测量的自适应背景校正方法

段亚轩 陈永权 赵建科 李 坤 龙江波

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

**摘要** 提出了一种基于针孔像分析的光学系统调制传递函数(MTF)测量自适应背景校正的方法。由 CCD 显微系统采集针孔目标经被测光学系统成像后的针孔像,计算线扩展函数,并对其进行自适应背景校正,获取 MTF。该方法与传统方法相比,消除了周围环境光照变化的影响,提高了测量精度。为验证所提方法的有效性,对标准镜头进行 MTF 测试,将测试结果与理论设计值比对,测试结果差异极大值为 0.01;与美国 Optikos 公司的测试结果比对,测试结果差异极大值为 0.015;对大像差光学系统的轴上和轴外进行 MTF 测试,并将测试结果与美国 Optikos 公司测试结果比对,测试结果差异极大值为 0.013。实验表明,该方法可满足对不同像差光学系统轴上和轴外 MTF 的测量。

**关键词** 测量;调制传递函数;线扩展函数;自适应背景校正

**中图分类号** O438.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0812008

## A New Adaptive Background Correction Method Based on Pinhole Image Analysis in Optical System Modulation Transfer Function Measurement

Duan Yaxuan Chen Yongquan Zhao Jianke Li Kun Long Jiangbo

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

**Abstract** A new adaptive background correction method based on pinhole image analysis in optical system modulation transfer function (MTF) measurement is proposed. The pinhole image is got from the CCD, and the line spread function is computed from it. The MTF is got from the adaptive background correction to the line spread function. Compared with the traditional background correction method, it is unrelated to the change of ambience illumination, and the measurement accuracy is improved. Standard lens and aberrated lens are tested to prove the validity of the adaptive background method. The maximum difference between the test results of standard lens and the academic results is 0.01. Compared with Optikos MTF testing results, the maximum difference is 0.015. The maximum difference between test results of aberrated lens and Optikos MTF testing results is 0.013. The test results show that the adaptive background correction method is practical to the MTF tests of most optical lenses.

**Key words** measurement; modulation transfer function; line spread function; adaptive background correction

**OCIS codes** 12.4820; 110.4100; 110.2960; 110.4280

## 1 引 言

光学调制传递函数(MTF)是一种客观地评价光学系统成像质量的方法,它是空间频率为变量的函数,定量地描述了光学系统传递不同空间频率信息的特性,克服了诸如星点检验法、鉴别率法等传统像质检验方法的不足<sup>[1]</sup>。

目前,光学系统 MTF 的测试方法颇多,其中以针孔为目标物,采用面阵 CCD 为像接收器的数字傅

里叶分析方法,因其无需扫描、无需倾斜校正,可由针孔像直接得到点扩展函数,可实时二维检测,便于计算机处理,应用日益增多<sup>[2~5]</sup>。但 CCD 工作时自身有暗电流,易受周围环境照度影响,采集到的光强信号一般都叠加一个直流分量<sup>[6]</sup>。为了消除该直流分量在 MTF 测量时的影响,本文提出一种基于针孔像分析的光学系统 MTF 测量自适应背景校正的方法,并通过实验验证了该方法的可行性、实用性和

收稿日期: 2011-03-31; 收到修改稿日期: 2011-04-27

作者简介: 段亚轩(1983—),男,硕士,工程师,主要从事光学测试技术方面的研究。E-mail: 6216366@163.com

普适性。

## 2 基于针孔像分析的光学系统 MTF 测量原理及自适应背景校正

### 2.1 基于针孔像分析的光学系统 MTF 测量原理

基于针孔像分析的光学系统 MTF 测试系统装置图如图 1 所示。

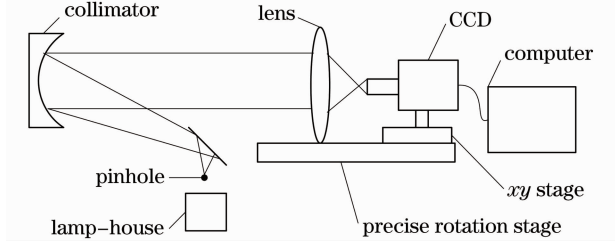


图 1 测试系统示意图

Fig. 1 Schematic of test system

利用 CCD 显微系统采集到针孔像,选取包含针孔像的二维窗口大小  $L \times W$ ,  $L$  为扫描方向,  $W$  为积分方向,则点扩展函数  $F_{\text{PSF}}(x, y)$  为

$$F_{\text{PSF}}(x, y) = I(x, y), \quad (1)$$

式中  $x, y$  对应于 CCD 靶面的像素坐标,  $I(x, y)$  为窗口针孔像的灰度分布;得到窗口内目标的点扩展函数后,分别在针孔像的水平方向和垂直方向积分求和,可得到两个方向上的线扩展函数 (LSF)  $F_{\text{LSF}}(x)$  和  $F_{\text{LSF}}(y)$  为

$$F_{\text{LSF}}(x) = \sum_{y=1}^W F_{\text{PSF}}(x, y), \quad (2)$$

$$F_{\text{LSF}}(y) = \sum_{x=1}^L F_{\text{PSF}}(x, y). \quad (3)$$

对上述线扩展函数分别傅里叶变换取模归一化,得到整个系统的传递函数为

$$T_{\text{MTF}_{\text{system}}} = \frac{\text{abs}[\mathcal{F}_F(F_{\text{LSF}})]}{\max\{\text{abs}[\mathcal{F}_F(F_{\text{LSF}})]\}}, \quad (4)$$

式中  $\text{abs}$  表示取模算子,  $\mathcal{F}_F$  为快速傅里叶变换算子,  $\max$  表示求最大值算子,扣除针孔有限大小引起的传递函数下降、CCD 显微测量系统的传递函数  $T_{\text{MTF}_{\text{CCD}}}$ ,即可得到光学镜头的调制传递函数  $T_{\text{MTF}_{\text{lens}}}$  为<sup>[7~10]</sup>

$$T_{\text{MTF}_{\text{lens}}} = \frac{T_{\text{MTF}_{\text{system}}}}{T_{\text{MTF}_{\text{pinhole}}} \times T_{\text{MTF}_{\text{CCD}}}}, \quad (5)$$

式中  $T_{\text{MTF}_{\text{pinhole}}} = \frac{2J_1(\pi af)}{\pi af}$ ,  $J_1(\pi af)$  为一阶贝塞尔函数,  $a$  为针孔像直径,  $f$  为空间频率。

### 2.2 自适应背景校正计算

在 MTF 测试中,为了消除背景环境的影响,需

要对线扩展函数减掉合适的阈值  $T$ ,才能得到正确的测试结果。不同背景校正下的线扩展函数如图 2 所示。

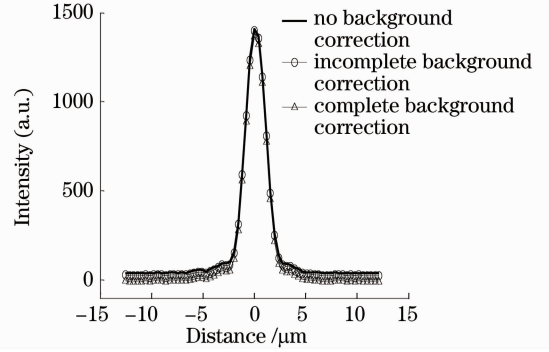


图 2 不同背景校正下的 LSF

Fig. 2 LSF of different background corrections

线扩展函数背景校正不足时,所得 MTF 曲线在低频处迅速下降。反之,校正过多会造成 MTF 曲线在低频处下降过于平缓,如图 3 所示。

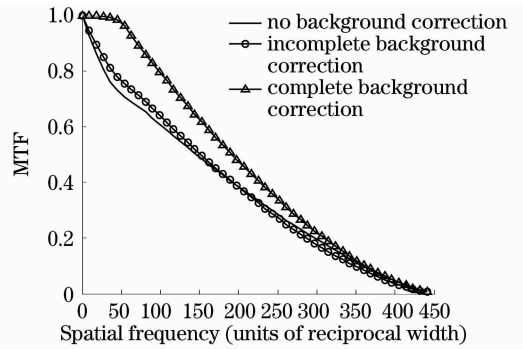


图 3 不同背景校正下的 MTF

Fig. 3 MTF of different background corrections

将零频处和相邻的两个低频  $f_1, f_2$  之间的 MTF 曲线用二次方程表示为

$$T_{\text{MTF}}(f) = 1 + k_1 f + k_2 f^2. \quad (6)$$

令  $f_1 = \frac{1}{d \times L_M / L}$ ,  $f_2 = 2f_1$ ,  $d$  为 CCD 的像元尺寸,  $L_M$  为显微物镜放大倍率。  $M_1$  和  $M_2$  分别对应空间频率  $f_1$  和  $f_2$  处的 MTF 测量值,则有

$$\begin{aligned} M_1 &= T_{\text{MTF}}(f_1) = 1 + k_1 f_1 + k_2 f_1^2, \\ M_2 &= T_{\text{MTF}}(f_2) = 1 + k_1 f_2 + k_2 f_2^2. \end{aligned} \quad (7)$$

由于 MTF 曲线在零频处下降的斜率  $s$  是固定值,对于圆形光瞳的光学系统有<sup>[11]</sup>

$$s = \frac{\partial T_{\text{MTF}}(f=0)}{\partial f} = k_1 = -\frac{4}{\pi} \lambda F, \quad (8)$$

式中  $\lambda$  为光学系统中心波长,  $F$  为被测光学系统  $F$  数。根据(6)~(8)式得

$$k_2 = \frac{(M_2 - M_1)\pi - 4\lambda F f_1 (M_2 - 2M_1)}{(4M_1 - M_2)\pi f_1^2}. \quad (9)$$

将(8)式和(9)式代入(5)式得

$$T_{\text{MTF}}(f) = 1 - \left(\frac{4}{\pi}\lambda F\right)f + \left[\frac{(M_2 - M_1)\pi - 4\lambda F f_1(M_2 - 2M_1)}{(4M_1 - M_2)\pi f_1^2}\right]f^2, \quad 0 \leq f \leq f_2. \quad (10)$$

(10)式给出了自适应背景校正的理论依据。

取线扩展函数的最小值  $k$ , 即  $k = \min(F_{\text{LSF}})$ ,  $\min$  表示求最小值算子,  $T$  为阈值且满足

$$T = k - P, \quad P \in [-k, k]. \quad (11)$$

线扩展函数减去阈值  $T$  后, 进行傅里叶变换取模归一化得到减去背景后的光学调制传递函数  $T_{\text{MTF}_N}$ , 即

$$T_{\text{MTF}_N} = \frac{\text{abs}[\mathcal{F}_F(F_{\text{LSF}} - T)]}{\max\{\text{abs}[\mathcal{F}_F(F_{\text{LSF}} - T)]\}}. \quad (12)$$

在空间频率  $f_1$  和  $f_2$  处的  $T_{\text{MTF}_N}$  值分别为

$$\begin{aligned} A_{1N} &= T_{\text{MTF}_N}(f_1), \\ A_{2N} &= T_{\text{MTF}_N}(f_2). \end{aligned} \quad (13)$$

自适应背景校正就是找到一个线扩展函数背景修正值  $T$ , 使得  $A_{1N}$  和  $A_{2N}$  分别与  $M_1$  和  $M_2$  无限接近甚至重合。采用  $G_N = \sqrt{(A_{1N} - M_1)^2 + (A_{2N} - M_2)^2}$  作为目标函数求其极小值  $G_{\min}$  来确定  $T$  的最优解。自适应背景校正流程图如图 4 所示。

### 3 实验验证

为了证明所提自适应背景校正方法的有效性, 对标准镜头和大像差镜头的 MTF 进行了测试。

实验装置包括: 光源、针孔目标、离轴折返式平行光管、精密转台、二维高精度平移台、CCD 显微系统。针孔目标放置于离轴折返式平行光管的焦面处, CCD 显微系统放置在二维平移台上。通过控制二维平移台和精密转台的运动, CCD 显微系统可采集到针孔目标经过被测镜头所成的清晰像, 再对针孔像分析计算得到被测镜头的 MTF。实验装置如图 1 所示。测试系统参数为: 离轴折返式平行光管焦距  $f_{\text{collimator}} = 1001.6 \text{ mm}$ ; CCD 像元尺寸  $d = 8.3 \mu\text{m}$ ; 显微物镜放大倍率  $L_M = 21.19$ 。

#### 3.1 标准镜头 MTF 测量实验

标准镜头参数: 焦距  $f_{\text{lens}} = 50 \text{ mm}$ ;  $F$  数为 4; 中心波长  $\lambda = 546.1 \text{ nm}$ ; 所选针孔直径  $a = 24.5 \mu\text{m}$ ; 窗口大小  $L \times W = 32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 。图 5 为标准镜头轴上针孔像。

未经自适应背景校正的标准镜头在子午和弧矢方向上的 MTF 实验结果如图 6 所示, 自适应背景校正后与美国 Optikos 公司光学传递函数测试仪(绝对

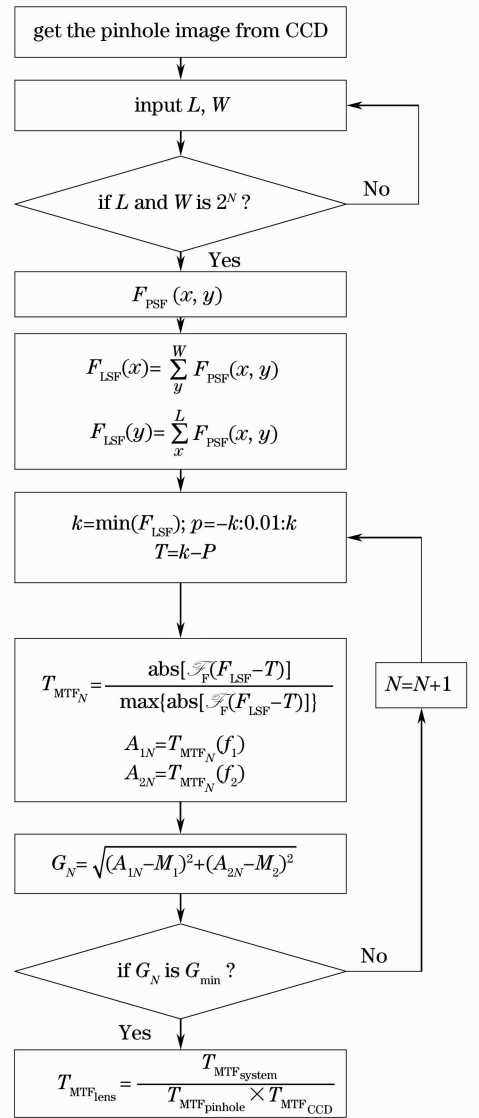


图 4 自适应背景校正流程图

Fig. 4 Flow chart of adaptive background correction



图 5 针孔像

Fig. 5 Pinhole image

测量精度 0.01) 测试结果和理论设计值对比如图 7 所示。

标准镜头测试结果与理论设计结果和美国 Optikos 公司测试的结果一致。表 1 给出了实验结果, 对比分析得到测试结果与镜头的理论设计值差

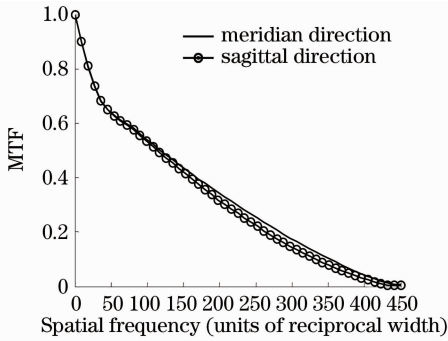


图 6 无自适应背景校正的标准镜头的 MTF  
Fig. 6 MTF of standard lens without adaptive background correction

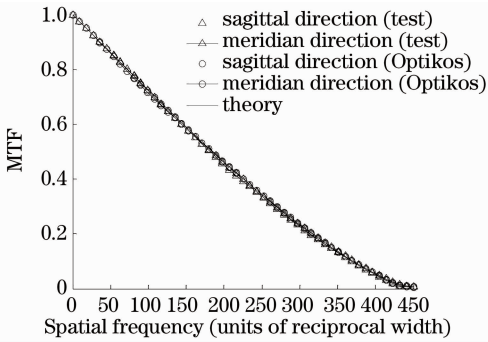


图 7 自适应背景校正后的标准镜头的 MTF  
Fig. 7 MTF of standard lens after adaptive background correction

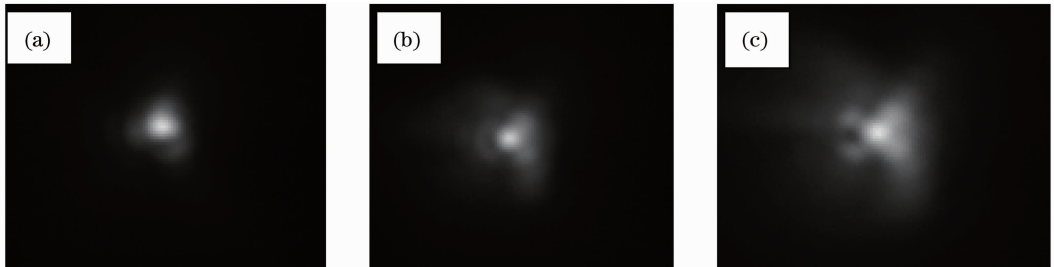


图 8 大像差镜头不同视场针孔像。(a)轴上;(b)轴外 4°;(c)轴外 6.5°

Fig. 8 Pinhole images of different angles. (a) On axis; (b) 4° outside axis; (c) 6.5° outside axis

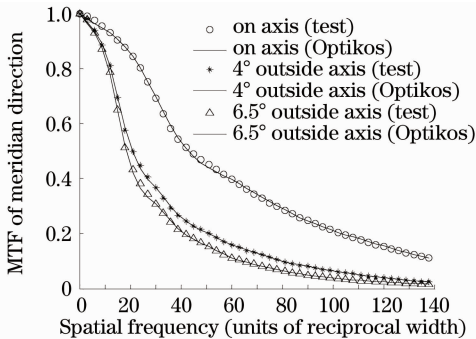


图 9 子午方向测试结果和 Optikos 结果  
Fig. 9 Test result of meridian direction and Optikos result

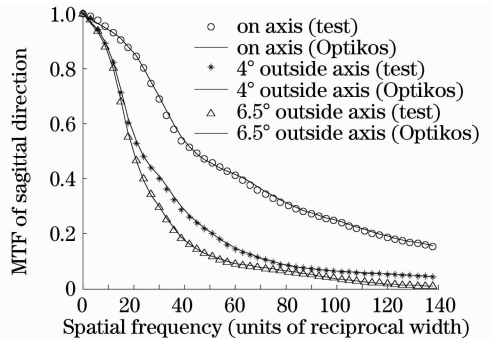


图 10 弧矢方向测试结果和 Optikos 结果  
Fig. 10 Test result of sagittal direction and Optikos result

异极大值为 0.01, 与美国 Optikos 公司光学传递函数测试仪测试结果差异极大值为 0.015。

表 1 标准镜头子午和弧矢方向测试结果

Table 1 Test results of standard lens on meridian direction and sagittal direction

Spatial frequency / (lp/mm)	Test result		Optikos result		Theory
	Meridian	Sagittal	Meridian	Sagittal	
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
40	0.890	0.890	0.887	0.888	0.889
80	0.781	0.780	0.770	0.772	0.778
120	0.668	0.667	0.661	0.666	0.670
160	0.556	0.559	0.559	0.561	0.564
200	0.460	0.451	0.461	0.459	0.461
240	0.364	0.359	0.367	0.366	0.364
280	0.274	0.268	0.277	0.273	0.272
320	0.195	0.189	0.194	0.191	0.188
360	0.119	0.116	0.119	0.118	0.114

### 3.2 大像差镜头轴上和轴外 MTF 测试

大像差镜头参数: 焦距  $f_{\text{lens}} = 80 \text{ mm}$ ;  $F$  数为 4; 中心波长  $\lambda = 546.1 \text{ nm}$ 。所选针孔直径  $a = 200 \mu\text{m}$ ; 轴上所选的窗口  $L \times W = 128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ ; 轴外  $4^\circ$  和  $6.5^\circ$  所选的窗口  $L \times W = 256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。

由 CCD 采集到大像差镜头不同视场的轴上、轴

外  $4^\circ$  和轴外  $6.5^\circ$  的针孔像如图 8 所示。经自适应背景校正后与美国 Optikos 公司光学传递函数测试仪测试结果在子午方向和弧矢方向对比如图 9, 图 10 所示。由图 9, 图 10 可以看出, 大像差镜头的线扩展函数经自适应背景校正后, 得到的 MTF 测试结果与 Optikos 公司传递函数仪测试结果基本一致。

表 2 大像差镜头子午方向测试结果

Table 2 Test result of aberrated lens on meridian direction

Spatial frequency (lp/mm)	On axis		$4^\circ$ outside axis		$6.5^\circ$ outside axis	
	Test	Optikos	Test	Optikos	Test	Optikos
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
10	0.946	0.941	0.867	0.867	0.849	0.849
20	0.856	0.857	0.518	0.523	0.452	0.451
30	0.692	0.698	0.368	0.367	0.308	0.308
40	0.532	0.536	0.258	0.261	0.210	0.209
50	0.456	0.445	0.205	0.205	0.158	0.157
60	0.397	0.396	0.159	0.160	0.113	0.113
70	0.339	0.344	0.128	0.130	0.088	0.087
80	0.288	0.291	0.100	0.101	0.065	0.065

表 3 大像差镜头弧矢方向测试结果

Table 3 Test result of aberrated lens on sagittal direction

Spatial frequency (lp/mm)	On axis		$4^\circ$ outside axis		$6.5^\circ$ outside axis	
	Test	Optikos	Test	Optikos	Test	Optikos
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
10	0.946	0.942	0.873	0.877	0.859	0.860
20	0.855	0.858	0.548	0.561	0.490	0.496
30	0.688	0.699	0.402	0.409	0.296	0.299
40	0.528	0.540	0.279	0.287	0.175	0.178
50	0.462	0.458	0.206	0.207	0.121	0.121
60	0.411	0.417	0.145	0.149	0.090	0.092
70	0.354	0.365	0.111	0.113	0.077	0.079
80	0.306	0.313	0.085	0.087	0.063	0.065

## 4 结 论

对光学系统 MTF 测量中自适应背景校正进行了分析, 提出了一种基于针孔像分析的光学系统 MTF 测量中的自适应背景校正方法。为了验证该方法的有效性, 分别对标准镜头 MTF, 大像差镜头轴上和轴外 MTF 进行了测试。实验结果与理论结果和美国 Optikos 公司光学传递函数测试仪测试结果进行了对比, 表明这种方法能够运用于各种像差镜头轴上和轴外的 MTF 测试。

## 参 考 文 献

- Zhuang Songlin, Qian Zhenbang. Optical Transfer Function[M]. Beijing: China Machine Press, 1981. 177~237
- 庄松林, 钱振帮. 光学传递函数[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981. 177~237

表 2 和表 3 给出了大像差镜头子午方向和弧矢方向测试结果, 结果对比分析得到子午方向与 Optikos 公司光学传递函数测试仪测试结果差异极大值为 0.011, 弧矢方向与 Optikos 公司光学传递函数测试仪测试结果差异极大值为 0.013。

- Li Tiecheng, Tao Xiaoping, Feng Huajun *et al.*. Modulation transfer function calculation and image restoration based on slanted-edge method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2891~2897
- 李铁成, 陶小平, 冯华君等. 基于倾斜刃边法的调制传递函数计算及图像复原[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2891~2897
- Dominique Léger, Joël Duffaul, Françoise Robinet. MTF measurement using spotlight [C]. Proceedings of the 1994 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994, **4**: 2010~2012
- Jeffrey T. Olson, Richard L. Espinola, Eddie L. Jacobs. Comparison of tilted slit and tilted edge superresolution modulation transfer function techniques[J]. *Opt. Engng.*, 2007, **46**(1): 016403
- Song Zongxi, Gao Wei, Zhou Yan *et al.*. New method to improve measurement accuracy of modulation transfer function [C]. *SPIE*, 2010, **7656**: 76561N
- Ding Xiaohua, Li You, Yu Qifeng *et al.*. CCD noise calibration and its application in edge location[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 99~104

- 丁晓华, 李 由, 于起峰 等. CCD 噪声标定及其在边缘定位中的应用[J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 99~104
- 7 Ma Weihong, Ma Zhen, He Li *et al.*. System parameter setting in video OTF test[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **35**(5): 765~768
- 马卫红, 马 臻, 贺 丽 等. 视频光学传递函数测试中的系统参数设置[J]. 光子学报, 2005, **34**(5): 765~768
- 8 Zhang Xiaolin, Du Guohao, Deng Biao *et al.*. High precision measurement of modulation transfer function for X-ray CCD with knife-edge method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1680~1687
- 张晓琳, 杜国浩, 邓 彪 等. 刀口法高精度测量 X 射线 CCD 调制传递函数研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1680~1687
- 9 Feng Zhiwei, Cheng Haobo, Song Qian *et al.*. Modulation transfer function measurement of electron multiplying CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1710~1716
- 冯志伟, 程灏波, 宋 谦 等. 电子倍增电荷耦合器件的调制传递函数测量[J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1710~1716
- 10 Yang Hua, Jiao Wenchun, Zhu Yonghong *et al.*. Modulation transfer function of CCD camera at Nyquist frequency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 313~316
- 杨 桦, 焦文春, 朱永红 等. CCD 相机在系统奈奎斯特频率处的调制传递函数[J]. 光学学报, 2002, **22**(3): 313~316
- 11 Willams T. L. The Optical Transfer Function of Imaging Systems[M]. Bristol: Institute of Physics Publishing, 1999. 345~550