

基于倾斜刃边法航空相机像移的调制传递函数测量

孙崇尚^{1,2} 王琦³ 丁亚林¹ 王德江^{1*} 孟繁浩^{1,2} 张雷¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中科院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049; ³ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 由于航空相机拍照时存在像移,会导致成像质量下降,因此在航空相机中必须有像移补偿机构。目前一般采用主观判据,即通过人眼判别是否存在像移以及像移量的大小,来评价像移补偿系统的性能是否达到设计要求。主观判据受人的主观性影响较大,而且只能定性评价。为了建立航空相机成像质量与像移补偿系统其他指标之间的直接关系,提出使用倾斜刃边法测量航空相机像移的调制传递函数(MTF)。设计了相应的实验,实验中通过转台的转动模拟航空相机的扫描像移,分别通过倾斜刃边法测量像移的 MTF 和通过理论模型计算像移的 MTF。实验结果表明,在空间频率为 0.10 cycle/pixel 时,转台以 3、5、8°/s 转动时,两种方法得到的 MTF 之间的误差百分比分别为 0.77%、1.15%、4.91%,进而证明了该方法的有效性。

关键词 成像系统;航空相机;像移;调制传递函数;倾斜刃边法

中图分类号 V245.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1212001

Modulation Transfer Function Measurement of Image Motion of Aerial Camera Based on Slanted-Edge Method

Sun Chongshang^{1,2} Wang Qi³ Ding Yalin¹ Wang Dejiang¹ Meng Fanhao^{1,2} Zhang Lei¹

¹ Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ School of Photo-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Image motion of aerial camera during exposure time leads to the degradation of image quality, so image motion compensation system is essential for aerial camera. Subjective criterion, namely image motion is distinguished by human eyes, is always used to evaluate whether the performance of the image motion compensation system meets the design requirements. Subjective criterion is usually influenced by people, and only provides qualitative evaluation. In order to establish the direct relationship between image quality of aerial camera and other index of image motion compensation system, modulation transfer function (MTF) measurement of image motion based on slanted-edge method is presented. Then experiment is designed to verify this method. Image motion caused by scanning of aerial camera is simulated by the rotation of turntable, and the MTF of image motion is obtained by two ways. One is measured by slanted-edge method, and the other one is calculated by theoretical model. Experimental results show that when spatial frequency is 0.10 cycle/pixel and the turntable rotates at 3, 5, 8°/s, the difference between the MTF obtained by the two methods is 0.77%, 1.15%, and 4.91%, thus the effectiveness of this method is demonstrated.

Key words imaging systems; aerial camera; image motion; modulation transfer function; slanted-edge method

OCIS codes 110.0100; 110.4100; 120.0280; 110.3000

收稿日期: 2014-06-13; 收到修改稿日期: 2014-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(61308099, 61304032)

作者简介: 孙崇尚(1989—),男,博士研究生,主要从事航空相机像移补偿方面的研究。E-mail: sun2007cn@163.com

导师简介: 丁亚林(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事航空相机总体设计方面的研究。

E-mail: dingyl_1964@126.com

* 通信联系人。E-mail: wangdj04@ciomp.ac.cn

1 引 言

航空相机拍照时,由于振动、载机的运动及相机摆动等使相机在曝光时,被照物影像与感光介质之间存在相对运动,带来了成像模糊及拖尾效应,此即像移^[1-2]。像移的存在会导致航空相机的成像分辨率下降,严重影响航空相机的整机性能,因此航空相机中必须采用像移补偿技术来提高成像质量。航空相机设计和装调时需要对象移补偿系统的性能进行评价,以确定是否能够达到设计要求。目前一般通过对相机进行成像实验,通过人眼判别是否存在像移以及像移量的大小,即主观判据。主观判据由于受人的主观影响较大,而且只能定性评价,无法定量比较,严重限制了航空相机像移补偿技术的发展。无论是光机式像移补偿的控制精度^[3-5],还是时间延迟积分光电耦合器件(TDICCD)电子式像移补偿的电荷转移速度匹配精度^[6-7],都无法与成像质量直接关联,以进一步提高像移补偿的精度。

调制传递函数(MTF)作为评价光学系统成像质量的有力工具应用十分广泛,它能反映成像系统对目标不同空间频率的频谱的调制特性。由于航空相机工作在飞机等动载体上,曝光时间内像前后重叠,对比度下降,导致MTF下降。利用MTF作为评价工具分析航空相机的像移对成像的影响,不仅可以有机地将成像系统的成像质量和像移补偿系统的其他指标联系起来,而且可以简单直观地得到定量的评价标准。前人对各种形式运动引起的像移对成像的影响进行了分析建模,并以MTF为评价指标,得出了具有普遍意义的结论^[8]。

本文介绍了MTF测试常用的方法,并指出由于航空相机像移的特殊性,倾斜刃边法更适合测量航空相机像移的MTF,设计了相应的实验,实验中利用转台转动模拟航空相机的扫描像移,将利用理论模型计算出的像移的MTF与倾斜刃边法直接测得的MTF进行对比。对比结果表明,二者之间误差很小,几乎完全重合,进而证明了该方法的可行性。

2 MTF的测量与倾斜刃边法

2.1 MTF的测量

MTF的测量方法主要有正弦靶标法、狭缝法、倾斜刃边法等^[9]。

标准的调制传递函数测试应选用正弦靶标作为目标,但由于靶标制造工艺的限制,一般多选用易于制造的矩形靶标来进行测试。正弦靶标法在每个

要测试的空间频率至少需要一张照片,测试过程比较复杂。

狭缝法的优点在于通过数据运算能够较好地抑制噪声的影响,测试精度较高^[10]。缺点是狭缝制作难度高,而且对于不同的光电成像系统需要选择不同宽度的狭缝靶标,如果狭缝过宽,经校正之后系统调制传递函数可能出现较大的误差,而过窄的狭缝则容易出现亮度不够,导致采集的图像信噪比(SNR)较低。

倾斜刃边法^[11],也称倾斜刀口法,仅需一块刀口靶即可完成对不同光电成像系统的测试,且靶标易于加工,不受衍射影响。但这种方法容易受到噪声干扰,因此很多学者提出了一些改进策略,取得了很好的改善效果^[12-15]。倾斜刃边法的最大优点是只需要一张图像即可完成MTF的测量,方法简单有效,便于工程实现。美国国家航空航天局(NASA)应用倾斜刃边法成功地对IKONOS^[16], QuickBird^[17]等航天光学载荷进行了在轨MTF评价。

由于所要测试的航空相机的光学系统各不相同,像移补偿系统处于相对运动的状态,同时考虑到工程实现的难易程度,相比于其他方法,倾斜刃边法更适用于测量航空相机像移的MTF。

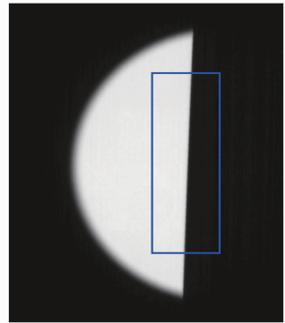


图1 在刀口靶上选取的ROI

Fig. 1 Selected ROI from the image of knife edge

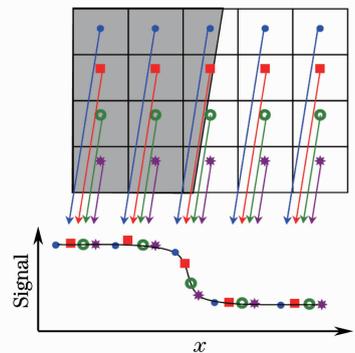


图2 沿着边缘方向投影像元信息

Fig. 2 Projection of data along the edge

2.2 倾斜刃边法

如图 1 所示,首先选取感兴趣区域(ROI),通过边缘检测找到刀口所在的像素区域。传统刀口法由于靶标边缘与探测器是垂直的,在计算时相当于只是用了图像中的一行信息,包含的边缘信息较少,存在欠采样的问题。倾斜刃边法通过将靶标与探测器

成一定倾角摆放实现过采样,将所有像元的信息沿着边缘的倾斜方向投影,通过拟合得到边缘扩展函数(ESF),如图 2 所示。通过对 ESF 微分得到线扩展函数(LSF),对 LSF 作一维傅里叶变换得到光学传递函数(OTF),取模即为 MTF,图 3 形象地表示了这个过程。

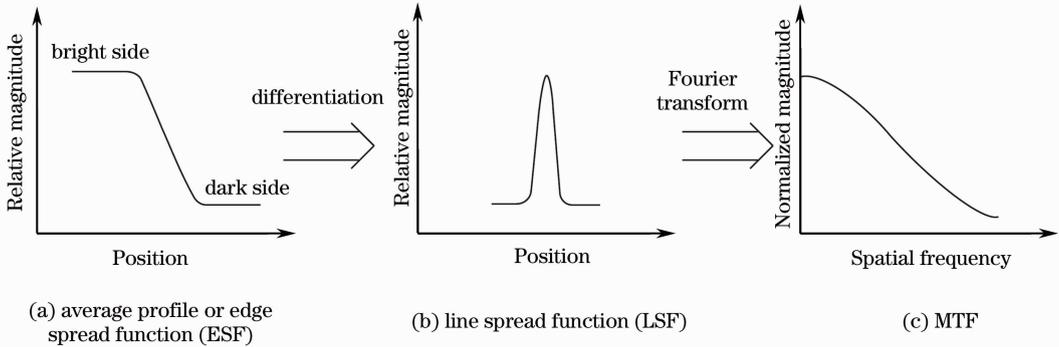


图 3 从 ESF 计算 MTF 的过程
Fig. 3 Calculation of MTF from ESF

3 航空相机像移的 MTF 理论模型与实验设计

由于导致像移的相对运动形式不同,对航空相机成像的影响也不同。为了简化分析,选择最简单的情况,即线性匀速运动带来的像移。航空相机在工作时,为获得足够大的收容宽度,扫描反射镜匀速转动,会带来扫描像移,对成像的影响可用传递函数表示为^[8]

$$M_{\text{motion}} = |\text{sinc}(\pi f v t_e)| = \left| \frac{\sin(\pi f v t_e)}{\pi f v t_e} \right|, \quad (1)$$

式中 f 为空间频率, v 为像平面上像移的速度, t_e 为曝光时间。

如图 4 所示,实验中使用转台的转动模拟航空相机的扫描像移,转台使用编码器和陀螺作为反馈,

控制转台以 $3 \sim 8^\circ/\text{s}$ 的不同角速度匀速转动。图 5 为实验装置实物图, CMOS 相机的焦距为 200 mm, 像元尺寸为 $5.5 \mu\text{m}$ 。图 6 为转台以不同的速度扫描时,扫描像移对成像影响的 MTF 曲线。可以看出,扫描速度越大时,相应的 MTF 曲线下降得也越快,高频信息也越少,成像质量越差。

使用倾斜刃边法分别测量转台静止时图像的传递函数 M_{still} 和转台匀速运动时图像的传递函数 MTF,按照理论分析,二者之间的关系为

$$M = M_{\text{still}} \times M_{\text{motion}}, \quad (2)$$

因此,实验中只需将测得的传递函数 M_{measure} 与通过(2)式计算得到的传递函数 $M_{\text{calculate}}$ 对比,看二者的拟合程度,即可验证使用倾斜刃边法测量航空相机像移 MTF 的可行性。

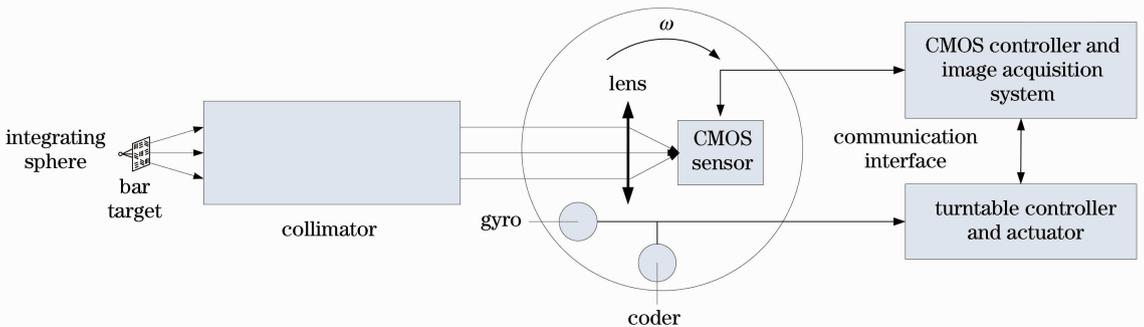


图 4 实验装置原理图
Fig. 4 Sketch of experimental setup

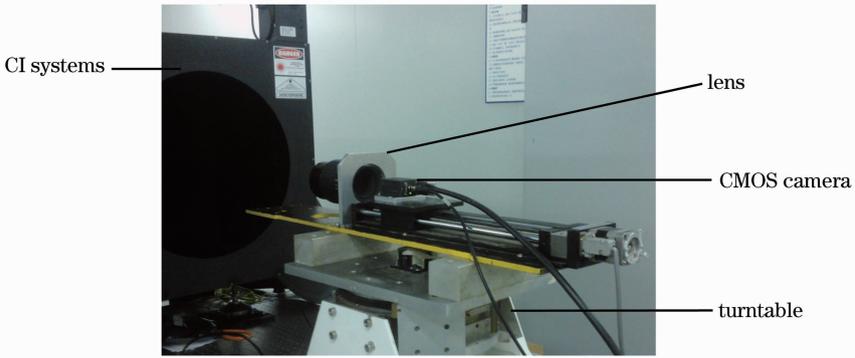


图 5 实验装置,其中 CI Systems 是包括靶标、积分球、平行光管的系统检测设备
 Fig. 5 Experimental device, in which CI Systems is a system testing equipment including bar target, integrating sphere and collimator

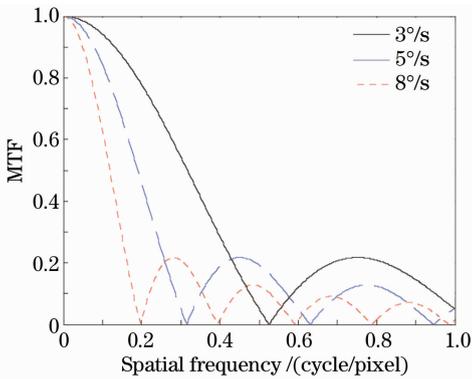


图 6 扫描像移对成像影响的 MTF 曲线
 Fig. 6 MTF of image motion caused by scanning

4 实验结果分析

图 7 为转台分别以 3~8°/s 旋转时,静止时图像的传递函数 M_{still} 、测得的 M_{measure} 以及计算得到的 $M_{\text{calculate}}$ 的对比。转台转动速度较小时,对应的像移量也较小,此时测得的 M_{measure} 与计算得到的 $M_{\text{calculate}}$ 两条曲线几乎重合,如图 7(a)和(b)所示。当转台速度变大时,如图 7(c)~(f)所示,在低频时测得的 M_{measure} 与计算得到的 $M_{\text{calculate}}$ 两条曲线几乎重合,而在空间频率到达 M_{motion} 曲线的第一个零点附近时,两条曲线之间开始存在差异。这是由倾斜刃边法本身导致的,该方法测量 MTF 时受噪声的影响较大,尤其在奈奎斯特频率附近的检测精度不高。考虑到

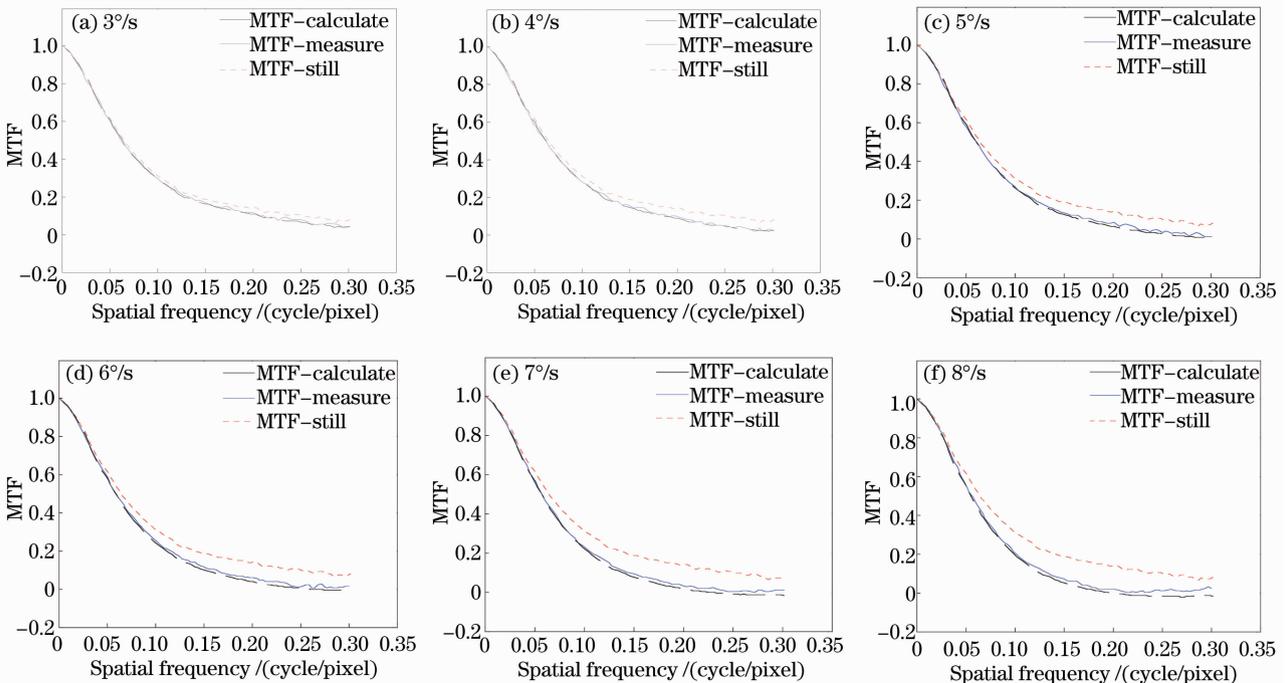


图 7 转台以不同角速度转动时像移的 MTF 曲线
 Fig. 7 MTF of image motion caused by rotation of turntable at different speeds

像移对成像质量影响的 M_{motion} 曲线过零点后, 图像属于伪分辨, 在实际成像时没有意义, 因此, 零点之前两条几乎重合的 MTF 曲线证明倾斜刃边法测量像移 MTF 的有效性。

表 1 转台以不同角速度旋转时计算和测量的 MTF

Table 1 Comparison of calculated MTF and measured MTF for different speeds

Rotating speed / [°/s]	3	4	5	6	7	8
M_{still}	0.315	0.315	0.315	0.315	0.315	0.315
M_{motion}	0.9414	0.8973	0.8424	0.7780	0.7056	0.6268
$M_{\text{calculate}}$	0.2966	0.2827	0.2654	0.2451	0.2223	0.1974
M_{measure}	0.2989	0.2829	0.2685	0.2566	0.2313	0.2076
Percentage error / %	0.77	0.07	1.15	4.48	3.89	4.91

5 结 论

航空相机加工和装调时对像移补偿系统的性能普遍使用人眼主观判别的方法, 缺乏客观量化的评价标准, 是当前限制像移补偿技术发展的关键因素。介绍了测量 MTF 常用的几种方法, 并根据像移补偿的实际情况, 指出倾斜刃边法更适合测量像移的调制传递函数。通过转台的转动模拟航空相机的扫描像移, 将倾斜刃边法测得的 MTF 与通过理论计算得到的 MTF 进行比较。实验结果证明, 在空间频率为 0.10 cycle/pixel, 二者的误差在 5% 以内, 进而证明了该方法的正确性。

在航空相机加工制造完成后, 只需对刀口靶标进行成像, 便可以使用倾斜刃边法获得调制传递函数, 进而以确定像移补偿系统的性能是否达到系统设计的要求。倾斜刃边法测量像移的传递函数, 建立了成像系统的成像质量与像移补偿系统的其他指标之间更为直接的成像链路关系。相比于人眼主观判别的方法, 该方法可以定量分析航空相机的像移, 从而为下一步的装调提供指导, 当然也更为可靠。

参 考 文 献

- Liu Ming, Kuang Haipeng, Wu Hongsheng, *et al.*. Survey on the image motion compensation technology [J]. *Electronics Optics & Control*, 2004, 11(4): 46-49.
- 刘明, 匡海鹏, 吴宏圣, 等. 像移补偿技术综述[J]. *电光与控制*, 2004, 11(4): 46-49.
- Zheng Lina, Zhang Tao, Kuang Haipeng, *et al.*. Image motion velocity measurement technique based on spatial filtering effect of line CCD for aerial camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1112002.
- 郑丽娜, 张涛, 匡海鹏, 等. 基于线阵 CCD 空间滤波效应的航空相机像移速度测量方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1112002.
- Liu Zhiming, Zhu Ming, Chen Li, *et al.*. Long range analysis and compensation of smear in sweep aerial remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0711001.

从表 1 可以看出, 当空间频率为 0.10 cycle/pixel, 转台以 3、5、8°/s 转动时, 实验测得的 M_{measure} 与计算得到的 $M_{\text{calculate}}$ 之间的误差百分比分别为 0.77%、1.15%、4.91%, 说明该方法的精确度很高。

- 刘志明, 朱明, 陈黎, 等. 长焦距全景式航空遥感器像拖影分析及补偿抑制方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0711001.
- Li Yanwei, Yuan Guoqin. Accuracy analysis of forward image displacement compensation device for aerial scan color CCD camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2439-2443.
- 李延伟, 远国勤. 面阵彩色航空遥感相机前向像移补偿机构精度分析[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2439-2443.
- Chen Li, Liu Zhiming, Wang Longqi, *et al.*. Research on image smear and distortion compensation in panoramic aerial camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0128004.
- 陈黎, 刘志明, 汪龙祺, 等. 全景式航空相机图像拖影与扭曲补偿系统研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0128004.
- Wang Dejiang, Dong Bin, Li Wenming, *et al.*. Influence of TDICCD charge transfer on imaging quality in remote sensing system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2500-2506.
- 王德江, 董斌, 李文明, 等. TDICCD 电荷转移对遥感相机成像质量的影响[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2500-2506.
- Guo Hanzhou, Lü Hengyi, Qu Lixin. Relation of line transfer period error and dynamic MTF of TDICCD in remote sensing camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(8): 2195-2200.
- 郭汉洲, 吕恒毅, 曲立新. 遥感相机动态调制传递函数与时间延迟积分 CCD 行周期误差的关系[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(8): 2195-2200.
- Robert D Fiete. Modeling the Imaging Chain of Digital Cameras [M]. Bellingham: SPIE Press, 2010.
- Glenn D Boreman. Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems [M]. Bellingham: SPIE Press, 2001.
- Bian Jiang, Ma Dongmei, Sun Ge, *et al.*. MTF test technology analysis of infrared electro-optical imaging system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(5): 748-753.
- 卞江, 马冬梅, 孙鸽, 等. 红外光电成像系统 MTF 测试技术分析[J]. *应用光学*, 2013, 34(5): 748-753.
- International Organization for Standardization. Photography-Electronic Still-Picture Cameras-Resolution Measurements [S]. 2001, ISO12233:2001.
- M Estriebeau, P Magnan. Fast MTF measurement of CMOS imagers using ISO 12233 slanted-edge methodology [C]. SPIE, 2004, 5570: 557-567.
- 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.

- 14 Xu Baoshu, Shi Zelin, Feng Bin. Modulation transfer function measurement method of electro-optical imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1111004.
徐保树, 史泽林, 冯 斌. 一种光电成像系统调制传递函数的测量方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1111004.
- 15 Zhao Zhanping, Fu Xingke, Huang Qiaolin, *et al.*. On orbit MTF test research of remote sensors based on knife-edge method [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009, 30(2): 37-43.
赵占平, 付兴科, 黄巧林, 等. 基于刃边法的航天光学遥感器在轨 MTF 测试研究[J]. *航天返回与遥感*, 2009, 30(2): 37-43.
- 16 Robert Ryan, Braxton Baldrige, Robert A Schowengerdt, *et al.*. IKONOS spatial resolution and image interpretability characterization [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88(1): 37-52.
- 17 M K Rangaswamy. Quickbird II Two-Dimensional On-Orbit Modulation Transfer Function Analysis Using Convex Mirror Array [D]. Brookings: South Dakota State University, 2003.

栏目编辑: 何卓铭