

文章编号:1002-2082 (2020) 01-0134-06

可见光电视摄像机整机 MTF 测量装置及方法

康登魁¹, 杨鸿儒¹, 袁 良^{1,2}, 姜昌录¹, 王 雷¹, 陈洁婧¹, 王生云¹

(1. 西安应用光学研究所 国防科技工业光学一级计量站, 陕西 西安 10065;
2. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要: 调制传递函数 (MTF) 是评价电视摄像机成像质量的重要参数。介绍了一种用于可见光电视摄像机整机 MTF 测量装置及方法。设计了三积分球目标发生器系统, 通过电动衰减器实现了目标和背景亮度的独立可控, 其出口不均匀性为 4.1%。采用基于倾斜狭缝法的亚像元自动插值与匹配算法以及线扩散函数 (LSF) 的最小二乘拟合分析法, 实现了倾斜角度的自动计算以及 MTF 的精确测量, 测量装置的重复性为 0.007。通过与国外先进仪器的比对实验, 表明建立的电视摄像机整机性能测量装置可以有效解决电视摄像机整机成像质量性能评价问题。

关键词: 光电成像系统; 线扩散函数; 调制传递函数

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202041.0103001](https://doi.org/10.5768/JAO202041.0103001)

Measurement device and method of MTF for visible TV camera

KANG Dengkui¹, YANG Hongru¹, YUAN Liang^{1,2}, JIANG Changlu¹,
WANG Lei¹, CHEN Jiejing¹, WANG Shengyun¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 2. School of Optoelectronics,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Modulation transfer function (MTF) is an important parameter to evaluate the imaging performance of TV cameras. A measuring device and method for MTF of visible TV camera were introduced. A three-integral spherical target generator system was designed, the target and background brightness can be independently controlled by electric attenuators. The outlet non-uniformity is 4.1%. An automatic sub-pixel interpolation algorithm based on slitting slit method and a least square method of line spread functions were utilized to realize the angle calculation automatically and MTF measurement accurately. The repeatability of the measuring device is 0.007, and the measurement uncertainty is $U=0.05$ ($k=2$). Finally, the comparison experiment with foreign advanced instruments shows that, the measurement device established can effectively solve the problem of evaluating the image quality of TV cameras.

Key words: electro-optical imaging system; line spread function; modulation transfer function

引言

可见光电视摄像机作为光电跟踪、识别瞄准、航空测控、空间光通信等领域的关键载荷之一, 已广泛应用于航空、船舶、光电火控、制导等军事领域以及机器视觉检测、机器人导航、工业检测、医学分析等民用领域。作为光电系统的图像输入设备, 可见光电视摄像机的成像质量直接决定着光

电系统的作用距离、视场范围、图像精度和动态响应等关键特性。光学传递函数(MTF)是评价光电系统成像质量的关键技术指标, 它综合了各种像差及星点检验的灵敏度, 反映的是被测系统对目标细节的传递能力。

国外对于调制传递函数测量仪器开发较早, 美国 OPTIKOS 公司、德国 TROPTICS 公司、英国

收稿日期:2019-06-24; 修回日期:2019-11-20

基金项目: 国防军工计量技术基础科研项目 (JSJL2015208A002)

作者简介: 康登魁 (1984-), 男, 博士研究生, 主要从事光学计量与测试方面的研究。E-mail: kdk205@163.com

IMAGE SCIENCE 公司、波兰 INFRAMAT 公司等都研制和生产调制传递函数测量设备。例如: 美国 Optikos 公司生产的 The Optikos OpTest Systems, 可以测量 MTF、PTF、LSF、PSF、ESF 及像散; 德国 Trioptics 公司生产的传递函数测试仪 MTF-Test Stations 可以测量 MTF、PTF、有效焦距等多种参数。自上世纪 90 年代开始, 哈尔滨工业大学、长春光机所、中航工业洛阳电光设备研究所等单位也相继开展了 MTF 测量装置的研究。但是, 以上测量装置都是针对光学系统或镜头进行测试, 并不能反映可见光电视摄像机的整机成像质量。整机成像性能往往还与光学系统与 CCD 的匹配、电子处理电路、图像转化精度(如图像识别精度、图像匹配精度)有关。目前, 随着光电技术的发展, 对光电系统整机 MTF 的测试需求日趋强烈^[1-5]。

本文介绍了一种可见光电视摄像机整机成像质量测量方法及测试装置。通过比对实验, 表明该装置可以有效完成可见光电视摄像机整机 MTF 的测试。

1 测量原理

传统的 MTF 测量方法通常有两类: 1) 直接法, 设置不同空间频率的正弦靶标, 通过观测系统响应直接得到测试结果; 2) 间接法, 利用刀口靶或狭缝靶获取图像计算扩展函数, 再通过傅里叶变换得到 MTF。间接方法是常用的方法, 被国际标准 ISO12233 指定为测量 MTF 的标准方法。

间接法通过测量线扩散函数 LSF 的一系列关于坐标位置的离散抽样值, 变成数字信号后, 输入计算机进行傅里叶变换运算, 从而求得光学传递函数的方法。

由一维传递函数的定义式, 光学传递函数 OTF 可以写成线扩散函数 LSF 的傅里叶变换式, 即

$$\begin{aligned} \text{OTF}(f_x) &= \Delta u \sum_{k=0}^{N-1} \text{LSF}(u_k) \exp(-2\pi j f_x u_k) \\ &= C(f_x) - j S(f_x) \end{aligned} \quad (1)$$

实际测量时, 一般采用倾斜狭缝法。该方法的思想是使狭缝像与探测器单元排列方向存在一定夹角, 探测器每行采集到的狭缝像灰度不同, 通过对多行狭缝像灰度数据处理, 得到插值后的 LSF, 从而解决采样率不足的问题。该方法的关键是确定亚像元采样间隔以及多行 LSF 曲线插值的间距, 只有通过正确间隔进行多行数据插值, 才能获

得可靠的高分辨率 LSF 曲线, 进而获得无混叠 MTF 测试结果^[6], 如图 1 所示。

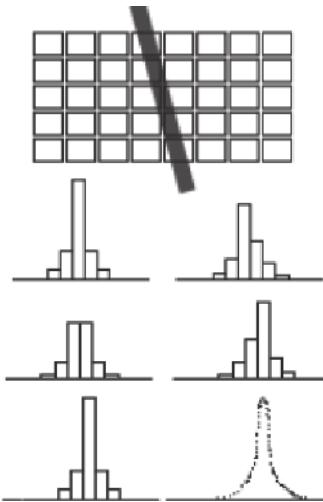


图 1 倾斜狭缝法测量原理图

Fig. 1 Schematic of tilting slit method

2 测量装置组成

可见光电视摄像机整机性能测试装置由目标发生器系统、光学准直系统、多维调整台、电器控制系统、图像/标准视频采集系统、监视器、综合处理软件等部分组成, 测量装置的原理图及实物图如图 2、图 3 所示。

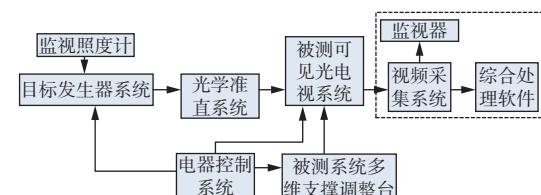


图 2 测量装置原理框图

Fig. 2 Schematic of measuring device

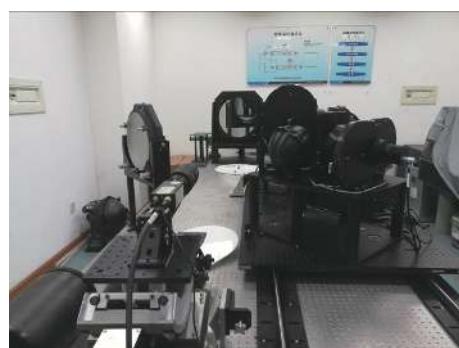


图 3 电视摄像机 MTF 测量装置实物图

Fig. 3 MTF measuring device for TV camera

目标发生器系统采用三积分球的结构形式,其结构框图如图 4 所示。该光源系统结构主要由背景积分球、前景积分球、主积分球、灯室、靶轮结构及电动衰减器组成。光源通过准直系统后,在入射主积分球内进行分光,一部分通过背景衰减器进入背景积分球内直接出射。另一束光通过前景衰减器后进入前景积分球,照亮测试目标靶。目标光束和背景光束通过合束镜进行合束,为待测电视摄像机提供测试目标。

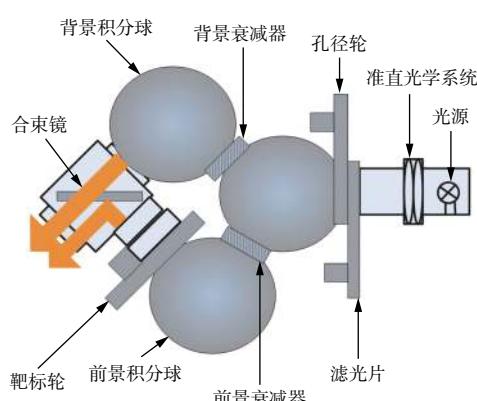


图 4 目标发生器原理图

Fig. 4 Schematic of object generator

视频采集系统兼顾了模拟与数字标准视频接口模式,配置了 MeteorII 模拟采集卡,视频输入模式为 NTSC、PAL、RS-170 和 CCIR,传输速率: 130 MB/s。同时,配置了 Solios—ECL/XCL 数字采集卡,采样速率达到 85 MHZ,主要用于 Cameralink 接口的相机进行图像采集。

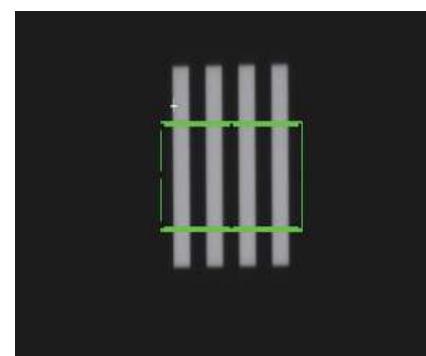
3 实验结果与分析

3.1 等效像元长度的标定

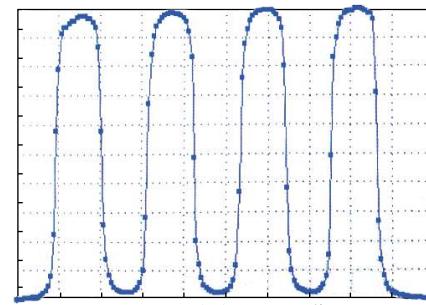
在进行 MTF 测量时,首先必须对数据采集系统的等效像元长度进行标定。标定通常采用周期经过校准的四杆靶,如图 5 所示。实验中采用的四杆靶为(长×宽)为 1.849 mm×2.103 mm。选择四杆靶的相关图像区域,通过测量软件,计算采集到的目标图像的周期宽度值,根据下式,计算出等效像元长度的标定值^[7-9]:

$$EAL = \frac{P_0}{P_1} \times 1024 \quad (2)$$

式中: EAL 为等效像元长度; P_0 和 P_1 分别为四杆靶的标准值和测量值; 1 024 为图像采集卡对应的最大像元数。



(a) 标定四杆靶图像



(b) 四杆靶的处理图像

图 5 等效像元长度的标定

Fig. 5 Calibration of equivalent pixel length

3.2 实验结果与讨论

采用 F400-CV-M2CL 数字摄像机进行实验,该相机系统参数如下: 焦距: 400 mm, 相对孔径: $F/3.8$, 靶面尺寸: 1", 像元尺寸: $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$, 有效像素数: $1600(\text{H}) \times 1200(\text{V})$, 狹缝宽度 100 μm 。倾斜狹缝图像如图 6 所示。

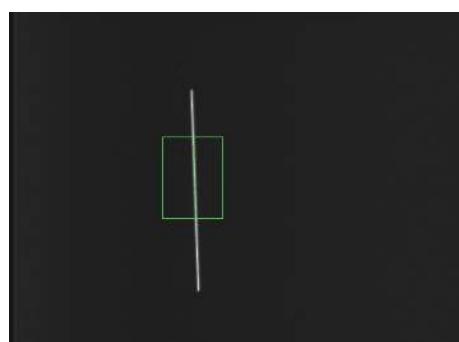


图 6 倾斜狹缝图像

Fig. 6 Tilted slit image

狹缝倾斜角度的具体方法为: 将灰度图像输入计算机软件, 得到灰度图像的数据矩阵, 逐行分析 LSF_i 数据。利用最小二乘法对每行的灰度数据系列进行数据拟合, 获得灰度系列 LSF_i 。在选定的图像处理区域内, 找出每一行灰度值的最大值, 其对应的坐标为 x_{\max} , 每一行均以 x_{\max} 为基准, 计算 x_{\max} 两端对称像素点的灰度值之差, 取绝对值,

形成一组差值数列。在数据系列中搜索出任意两相邻极小值数据所对应的行数作为插值的行数。则这两个行数的图像在探测器列方向上刚好对应了一个像元的宽度。例如: 在得到的数值序列中, 第 130 行和 160 行的线扩散函数曲线如图 7 所示, 其 2 个行数的差在探测器列方向刚好差了一个像元的宽度。则狭缝倾斜的角度为: $\alpha = \arctan(1/m) = \arctan(1/30) = 1.9^\circ$ 。

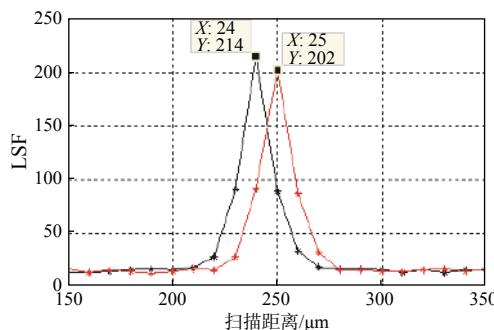


图 7 第 130 行和 160 行线扩散函数分布曲线

Fig. 7 LSF curve of line 130 and 160

根据以上角度, 进行插值配准, 就可以得到 LSF 曲线, 采用快速傅里叶变换, 并在每个频率点进行目标宽度校正, 可以得到如下的 MTF 测量曲线, 如图 8 所示^[10-11]。

4 与国外仪器的比对验证

为了验证测量装置的有效性, 本文采用美国 OPTIKOS 公司生产的 I-SITE 测量仪进行了比对实验。美国 OPTIKOS 公司是世界上光学成像质量测量设备的先进生产厂家。其 I-SITE 测量仪针对可见

光电视摄像机 MTF 的技术指标为: 光谱范围: (400~1 000) nm, MTF 测量精度 $\pm 4\%$, 其实物图 9 所示。

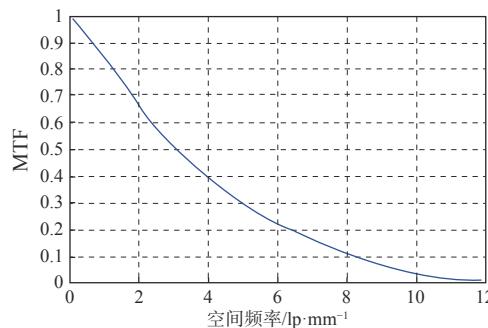


图 8 MTF 测量结果曲线

Fig. 8 MTF measurement result



图 9 I-SITE 测量仪实物图

Fig. 9 I-SITE measuring instrument

测试条件如下:

共轭方式: 物方无限远; 波长范围: 400 nm~1 000 nm; 焦距: 400 mm; 相对孔径: F/3.8; 方位: 子午 T; 视场角: 0°。

本文建立的光电系统整机 MTF 测量装置测量结果如表 1 所示。

I-SITE 测量仪 MTF 测量结果如表 2 所示。

表 1 光电系统整机 MTF 测量结果

Table 1 MTF measurement results of photoelectric system

次数	空间频率/lp·mm ⁻¹									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.85	0.66	0.50	0.39	0.30	0.22	0.16	0.13	0.07	0.05
2	0.85	0.66	0.50	0.38	0.30	0.22	0.16	0.13	0.07	0.05
3	0.85	0.66	0.50	0.39	0.30	0.22	0.16	0.13	0.07	0.05
4	0.84	0.67	0.51	0.40	0.31	0.22	0.16	0.14	0.08	0.05
5	0.86	0.67	0.51	0.40	0.30	0.22	0.16	0.13	0.07	0.05
6	0.85	0.66	0.50	0.39	0.30	0.21	0.15	0.13	0.07	0.05
7	0.85	0.66	0.50	0.39	0.30	0.22	0.16	0.13	0.07	0.06
8	0.85	0.67	0.51	0.39	0.31	0.21	0.14	0.12	0.07	0.05
9	0.85	0.67	0.51	0.40	0.30	0.22	0.16	0.14	0.08	0.05
10	0.85	0.66	0.50	0.38	0.29	0.22	0.16	0.14	0.08	0.05
平均值	0.85	0.66	0.50	0.39	0.30	0.22	0.16	0.13	0.07	0.05
标准偏差	0.005	0.005	0.005	0.007	0.006	0.004	0.007	0.006	0.005	0.003

表 2 I-SITE 测量仪 MTF 测量结果

Table 2 MTF measurement results of I-SITE

次数	空间频率/ $1/\text{p}\cdot\text{mm}^{-1}$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.90	0.69	0.53	0.40	0.31	0.23	0.14	0.13	0.06	0.05
2	0.91	0.69	0.52	0.41	0.31	0.23	0.14	0.13	0.06	0.05
3	0.90	0.69	0.52	0.40	0.31	0.23	0.14	0.13	0.07	0.05
4	0.90	0.69	0.53	0.40	0.32	0.23	0.14	0.14	0.06	0.05
5	0.90	0.68	0.52	0.40	0.31	0.23	0.14	0.13	0.06	0.05
6	0.90	0.69	0.53	0.40	0.32	0.22	0.14	0.13	0.07	0.05
7	0.90	0.68	0.52	0.41	0.31	0.23	0.14	0.13	0.06	0.06
8	0.90	0.69	0.52	0.40	0.31	0.23	0.13	0.12	0.06	0.05
9	0.90	0.69	0.52	0.40	0.31	0.22	0.14	0.14	0.06	0.05
10	0.90	0.69	0.53	0.40	0.31	0.22	0.14	0.14	0.06	0.05
平均值	0.90	0.69	0.52	0.40	0.31	0.23	0.14	0.13	0.06	0.05
标准偏差	0.003	0.004	0.005	0.004	0.004	0.005	0.003	0.006	0.004	0.003

从以上两表可以看出, 两套装置的重复性相当, 分别为 0.007 和 0.006。取表 1 和表 2 中的平均值进行比较, 如图 10 所示。其在低频处存在一定差异, 最大测量偏差为 0.05, 在中频段和后频段, MTF 曲线基本趋于一致。

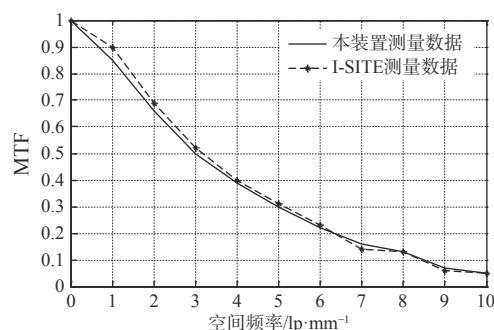


图 10 MTF 测量结果比较曲线

Fig. 10 Comparison curve of MTF measurement results

经分析, 造成低频段差异较大的主要原因为暗电流或背景校正不合适所引起的。暗电流一般是不均匀的, 而且与温度有关, 温度越高, 暗电流越大。如果滤除不足, 就会出现 MTF 太低, 如图 11 所示。如果滤除过剩, 则会出现 MTF 过高, 如图 12 所示。

因此, 在对 LSF 数据进行处理时, 背景响应或基底电压必须去除。通常可以采用在空间域减背景消除。本文采用选频和放大, 将入射光调制成一定频率的周期信号, 在输出电路中加一锁相放大器, 以滤掉暗电流的直流分量^[12-15]。

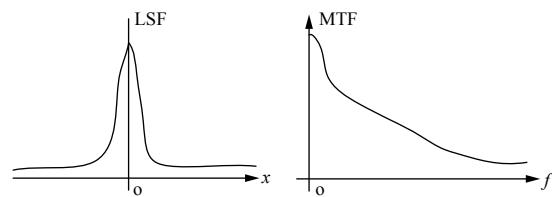


图 11 背景校正不足对 MTF 的影响

Fig. 11 Effect of insufficient background correction on MTF

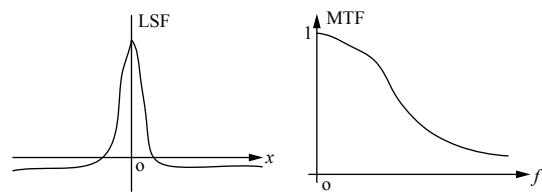


图 12 背景校正过剩对 MTF 的影响

Fig. 12 Effect of excess background correction on MTF

5 结论

本文提出了一种基于倾斜狭缝法的亚像元自动差值与匹配算法以及线扩散函数(LSF)的最小二乘拟合分析法, 实现了可见光电视摄像机 MTF 的精确测量。在此基础上, 建立了可见光电视摄像机 MTF 测量装置, 测量重复性达到 0.007。与美国 OPTIKOS 公司的 I-SITE 测量仪进行了比较, 验证了装置的有效性。

随着机载、车载以及舰载的各类光光电成像系统的广泛应用, 该装置可以提高系统检测效率, 为光电成像系统设计、装配和性能提升提供计量保障, 具有广泛的使用价值。

参考文献:

- [1] HUANG Yang, LI Xiaoxuan, NIU Jingchuan. Error analysis of static MTF measurement for remote sensor in laboratory[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2017, 15(2): 57-60.
黄阳, 李晓轩, 牛锦川. 遥感相机实验室静态MTF测量误差分析[J]. 光学与光电技术, 2017, 15(2): 57-60.
- [2] GUAN Mingzhen, ZHANG Xiaohui, ZHANG Ning. MTF measurement of CCD digital camera based on improved slanted -edge method[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(1): 100-103.
官明朕, 张晓辉, 张宁. 基于改进倾斜刃边法的CCD相机调制传递函数的测量[J]. 应用光学, 2016, 37(1): 100-103.
- [3] HAN Changyuan. Performance optimization of electro-optical imaging systems[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 1-9.
韩昌元. 光电成像系统的性能优化[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 1-9.
- [4] 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.
- [5] ZHU Xiangzhu, ZHANG Jianhui. The characteristic of optical transfer function[J]. Journal of Shaoyang University, 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, 2005, 2(2): 18-20.
- [6] TONG Wenquan. Infrared system MTF technology analysis[J]. Infrared, 2003(4): 16-22.
全文权. 红外系统MTF测试仪技术分析[J]. 红外, 2003(4): 16-22.
- [7] BIAN Jiang, MA Dongmei, SUN Ge. 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. 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.
- [8] XU Baoshu, SHI Zelin, FENG Bin. Modulation transfer function measurement method of electro-optical imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1111004-1-1111004-9.
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): 1111004-1-1111004-9.
- [9] YANG Hong. The calibration of optical transfer function equipment of large aperture in infrared and visible band[J]. Optical Technique, 2001(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(1): 87-94.
- [10] MA Weihong, MA Zhen, HE Li, et. al. Influency 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]. 光学学报, 2004, 24(2): 144-147.
- [11] ZHANG Muxin. Research on imaging evaluation of CCD camera basing on MTF method[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2015.
张牧欣. 基于MTF的CCD相机成像质量评价方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2015.
- [12] YANG Hong, KANG Dengkui, JIANG Changlu, et al. Visible light photoelectric imaging system machine integrated parameter calibration technology research[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 32(2): 254-258.
杨红, 康登魁, 姜昌录, 等. 可见光光电成像系统整机综合参数校准技术研究[J]. 应用光学, 2015, 32(2): 254-258.
- [13] CHENG Ying. On -orbit modulation transfer function(MTF) measurement for space camera[D]. Xi'an: Chinese Academy of Science(Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics), 2018.
程莹. 空间相机在轨MTF检测技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2018.
- [14] LI Hang, YAN Changxiang, SHAO Jianbing, et al. High accuracy measurement of the MTF of electro-optical imaging system based on modified slanted -edge method[J]. Journal of Photons, 2016, 45(12): 1211002-1-1211002-8.
李航, 颜昌翔, 邵建兵, 等. 基于改进倾斜刃边法的光电成像系统MTF高准确度测试[J]. 光子学报, 2016, 45(12): 1211002-1-1211002-8.
- [15] HE Xu, JI Qi. Study on modulation transfer function measurement instrument with matrix for matrix CCD[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(10): 1100-1108.
贺煦, 姬琪. 面阵CCD调制传递函数测试仪器研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10): 1100-1108.