

doi:10.3788/gzxb20164512.1211002

基于改进倾斜刃边法的光电成像系统 MTF 高准确度测试

李航^{1,2}, 颜昌翔¹, 邵建兵¹, 王小朋¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:提出一种能高准确度测试光电成像系统调制传递函数的改进的倾斜刃边法. 利用一种自动确定高低阈值的改进 Canny 算子提取边缘位置点, 对提取到的边缘位置点进行线性拟合求得刃边倾角, 在利用费米函数拟合边缘扩散函数的过程中, 提出一种邻域平均值和设定误差容限的多重去噪改进方法. 通过仿真与物理实验证明了本文方法的有效性, 并分析了刃边倾角、噪声变化对本文方法与传统方法 MTF 测试准确度的影响. 实验结果表明: 本文方法的调制传递函数测试准确度达到 0.004 9, 重复准确度达到 0.003 1, 皆优于传统方法; 说明其具有较高的测试准确度和良好的测试重复性, 并且具有较强的抗噪性, 基本不受刃边倾角变化的影响.

关键词:成像系统; 调制传递函数; 噪声; 改进倾斜刃边法; 刃边倾角; 边缘扩散函数

中图分类号: TP751; TN216

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)12-1211002-8

High Accuracy Measurement of the MTF of Electro-optical Imaging System Based on Modified Slanted-edge Method

LI Hang^{1,2}, YAN Chang-xiang¹, SHAO Jian-bing¹, WANG Xiao-peng¹

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science,
Changchun 130033, China)

(2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: In this study, an improved slanted edge method was proposed. It had a high accuracy for measuring the Modulation Transfer Function (MTF) of electro-optical imaging system. We put forward an automatic determination of the high and low threshold modified Canny operator to detect the edge points, and the edge slant angle is obtained by linear fitting of the edge points. In the process of fitting the edge spread function (ESF) by Fermi function, we put forward a modified method to reduce the influence of noise. It was composed of averaging in adjacent region and setting the tolerance of error. The method in this paper is proved effectively by the experimental results, and analyzing the influence of the change of the edge slant angle and noise on the MTF measurement accuracy. The experimental results show that the measurement accuracy of the modified slanted edge method is 0.004 9, and the repeat accuracy is 0.003 1, which is higher than the traditional methods. It proves that the modified slanted edge method has high measurement and repeat accuracy, and also has a better immunity to noise and edge angle.

Key words: Imaging systems; Modulation transfer function; Noise; Modified slanted-edge method; Edge angle; Edge spread function

OCIS Codes: 110.0110; 110.3000; 110.3080; 110.4100; 110.4280

基金项目: 国家 863 高新技术发展项目 (No. 2011AA12A103) 和中国地质调查局工作项目 (No. 1212011120227) 资助

第一作者: 李航 (1990—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光学系统设计与检测. Email: mhhiter08@163.com

导师 (通讯作者): 颜昌翔 (1973—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为空间光学遥感技术. Email: yanxc@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2016-05-26; **录用日期:** 2016-08-31

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

如何准确地评价光电成像系统的性能对于该系统在设计、加工和应用方面有着重要意义. 调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 是评价光电成像系统空间频率传递特性的关键指标之一, 其值是由光电成像系统的衍射效应、像差大小和探测器特性共同决定的^[1]. MTF 对于检验系统实际性能是否接近理论设计目标是十分重要的, 现有的 MTF 测试方法主要分为两类: 1) 利用随机靶标测试^[2], 该方法可以有效地解决系统欠采样问题, 但是靶标加工的困难、数据处理的繁琐限制了它的应用; 2) 利用固定图形靶标测试^[3], 主要是应用狭缝靶和刃边靶. Chambliss 等于 1995 年提出了狭缝法测试 MTF 的原理与具体操作流程^[4], 但是狭缝靶的制作难度大, 不同系统需要使用不同的狭缝靶, 且测试结果需根据狭缝宽度进行校正. 倾斜刃边法则具有靶标通用性强、数据采样率高、测试过程简单等优点, 广泛应用于各类光电成像系统的 MTF 测试, 并且被国际标准 ISO 12233 指定为电子静态图像相机分辨率测试的标准方法^[5]. 李铁成等^[6]、赵占平等^[7]应用倾斜刃边法对光学遥感载荷在轨 MTF 进行了测试; 高峰等^[8]、裘邵润等^[9]应用倾斜刃边法对医学成像领域的数字化 X 射线成像系统进行了性能评价.

在利用倾斜刃边法测试光电成像系统 MTF 的过程中, 测试过程易受噪声干扰, 刃边倾角测量误差较大、边缘扩散函数 (Edge Spread Function, ESF) 提取准确度不高, 从而导致系统的 MTF 测试准确度较低. 朱志亮等^[10]提出利用改进的 Hough 变换提取刃边倾角, 提高了运算速度, 但是 Hough 变换的准确度受到其参量空间人工量化的影响; Masaoka 等^[11]提出一种二维函数拟合刃边图像估算刃边倾角的方法, 该方法具有较好的抗噪性, 但函数拟合受到离散像元的影响, 使得刃边倾角的估计准确度不高, 且计算量较大. Yin 等^[12]提出利用高斯函数与指数函数的组合拟合 ESF 的方法; Tzannes 等^[13]提出利用费米函数拟合 ESF 的方法, 这些 ESF 的拟合方法易受噪声影响, 使得 ESF 的拟合准确度较低. 范冲等^[14]基于梯度与点扩散函数对称性提出了一种新的刃边拟合方法, 并对 ESF 样本数据进行了一定程度的去噪处理, 使得估计准确度与稳定性有所提高. 李进等^[15]提出了基于系统传递函数参量模型的 ESF 构建方法, 提高了 ESF 的构建准确度, 进而提高了系统 MTF 的估算准确度.

针对传统倾斜刃边法存在的问题, 本文提出了利用一种自动确定高低阈值的改进 Canny 边缘检测算子提取边缘位置点, 对提取到的边缘位置点进行线性拟合求得刃边倾角的刃边倾角测量方法; 对费米函数拟合 ESF 的过程进行了改进, 提出了有效的降噪措施,

提高了 ESF 的拟合准确度; 最后, 通过仿真和物理实验对传统方法与本文方法进行了测试分析.

1 MTF 测量原理及方法

1.1 MTF 的测量原理

MTF 是系统对不同空间频率的正弦曲线靶标的定量响应, 正弦曲线靶的明暗亮度沿空间某一方向周期性变化, 设最亮处亮度为 I_{\max} , 最暗处亮度为 I_{\min} . 为表达图像的明暗反衬程度, 定义调制度为

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1)$$

系统成像后像的调制度要低于物的调制度, 定义调制传递函数表示成像前后调制度的降低程度, 则频率 f 处的调制传递函数为

$$\text{MTF}(f) = \frac{M_{\text{image}}(f)}{M_{\text{object}}(f)} \quad (2)$$

式中, M_{object} 表示物的调制度, M_{image} 表示像的调制度.

按 MTF 的定义, 可以直接使用正弦曲线靶标测试系统的 MTF, 但考虑到正弦靶的加工难度, 一般通过间接测量点扩散函数 (Point Spread Function, PSF)、线扩散函数 (Line Spread Function, LSF) 或 ESF 来求得系统的 MTF. 点脉冲法是给成像系统提供一个点光源输入, 经系统成像后的亮度分布函数就是 PSF, 对 PSF 进行二维傅里叶变换即可得到系统的 MTF, 即

$$\text{MTF}(u, v) = |F[\text{PSF}(x, y)]| \quad (3)$$

狭缝法是利用狭缝靶标给成像系统提供一个线光源输入, 其成像后的亮度分布函数就是 LSF. 线光源可以看作点光源沿狭缝方向的集合, 所以对 PSF 沿狭缝方向积分即是 LSF, 对 LSF 进行一维傅里叶变换可求得垂直于狭缝方向的 MTF, 其关系为

$$\text{LSF}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{PSF}(x, y) dy \quad (4)$$

$$\text{MTF}(u, 0) = |F[\text{LSF}(x)]| \quad (5)$$

刃边法是利用刃边靶标给成像系统提供一个阶跃输入, 其成像后的亮度分布函数就是 ESF, ESF 和 LSF 之间关系为

$$\text{LSF}(x) = \frac{d}{dx}[\text{ESF}(x)] \quad (6)$$

由式(6)可知, LSF 为 ESF 的导数, 所以刃边法测试 MTF 的原理是先根据刃边图像提取出 ESF, 对 ESF 求导得到 LSF, 再对 LSF 进行傅里叶变换得到系统的 MTF, 如图 1.

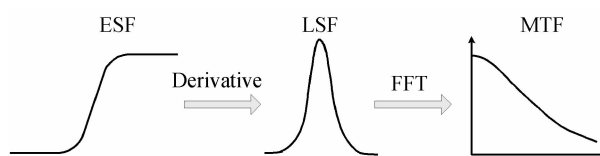


图 1 倾斜刃边法测试 MTF 原理
Fig. 1 Principle diagram of measuring MTF by slanted-edge method

1.2 ISO 12233 倾斜刃边法

ISO 12233 倾斜刃边法是电子静态图像相机 MTF 测试的标准方法,测试的主要过程为:在采集到的刃边图像中选取计算所需的刃边区域(Region of Interest, ROI);计算所选区域内每行 ESF 数据的导数,求得 LSF;计算所选区域内每行 LSF 的重心位置,即为每行刃边所对应的边缘位置,对所有的边缘位置点进行线性拟合求得刃边倾角;计算每个相位周期内所含的行数,调整所选区域的大小,使所选区域包含整数个相位周期;将所选区域内的所有像素点沿刃边方向投影到第 1 行,取原采样间隔的 1/4 作为新的采样间隔,对每个采样间隔内的像素灰度值取平均,即获得平均上采样 ESF;对平均上采样 ESF 求导即可获得平均上采样 LSF;利用 hamming 滤波器对 LSF 进行处理,并做傅里叶变换求取 MTF. ISO 12233 倾斜刃边法的刃边倾角计算是通过每行数据求导后计算 LSF 的重心位置,平均上采样 LSF 的获取也是通过对平均上采样 ESF 求导,从而导致此方法易受刃边图像中噪声的干扰,降低了系统 MTF 的测试准确度.

2 本文方法

在利用倾斜刃边法测试光电成像系统 MTF 的过程中,刃边倾角的精确测量、ESF 的精确提取一直是倾斜刃边法的关键点与难点.本文在分析传统方法的基础上,提出了一种改进的倾斜刃边法保证刃边倾角测量与 ESF 提取的准确度,从而提高光电成像系统 MTF 的测试准确度.

2.1 刃边倾角的测量方法

传统的倾斜刃边法首先利用微分边缘检测算子处理刃边图像,但是一阶、二阶微分边缘检测算子对含有噪声的刃边图像边缘检测效果差,而 Canny 边缘检测算子则具有信噪比大、定位准确度高、单边缘响应性好的优点,是一种对阶跃型边缘检测近似最优的算子.但是,利用 Canny 算子进行边缘检测时,需要人为地设定高低阈值来筛选边缘点,对同一图像设定不同的高低阈值其边缘检测效果差异较大.为了对光电成像系统采集到的刃边图像实现刃边倾角的自动测量,避免人为设定条件产生的影响,提出利用一种自适应的 Canny 算子进行边缘检测,可以根据刃边图像的特征自动获取最优的高低阈值.

不同类间分离性最好的判据是数理统计意义上的类间方差最大或类内方差最小,因此,算法的具体实现是利用梯度幅值直方图和最小化类内方差.将刃边图像中像素灰度的梯度幅值分为 m 级,并把像素分成 C_1 、 C_2 、 C_3 三类. C_1 表示图像中非边缘点像素,对应灰度梯度幅值为 $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ 的像素点, C_2 表示图像中可能为边缘点像素,对应灰度梯度幅值为 $\{t_{k+1}, t_{k+2},$

$\dots, t_k\}$ 的像素点, C_3 表示图像中是边缘点像素,对应灰度梯度幅值为 $\{t_{k+1}, t_{k+2}, \dots, t_m\}$ 的像素点. 梯度幅值为 t_i 的像素数量为 n_i ,刃边图像中的像素总数为 N . 则 C_1 、 C_2 、 C_3 每类内像素的梯度幅值均值为

$$\begin{cases} e_1(k_1) = \sum_{i=1}^{k_1} t_i n_i / \sum_{i=1}^{k_1} n_i \\ e_2(k_1, k_2) = \sum_{i=k_1+1}^{k_2} t_i n_i / \sum_{i=k_1+1}^{k_2} n_i \\ e_3(k_2) = \sum_{i=k_2+1}^m t_i n_i / \sum_{i=k_2+1}^m n_i \end{cases} \quad (7)$$

可求得类内方差的表达式为

$$\sigma^2(k_1, k_2) = \left\{ \sum_{i=1}^{k_1} [t_i - e_1(k_1)]^2 n_i + \sum_{i=k_1+1}^{k_2} [t_i - e_2(k_1, k_2)]^2 n_i + \sum_{i=k_2+1}^m [t_i - e_3(k_2)]^2 n_i \right\} / N \quad (8)$$

通过搜索求解满足 $\min[\sigma^2(k_1, k_2)]$ 的 k_1 、 k_2 值,则 C_1 、 C_2 内像素总数占总像素数的比例即为高阈值, C_1 内像素数占总像素数的比例即为低阈值. 利用自动确定高低阈值的 Canny 边缘检测算子将倾斜刃边图像转换成边缘的二值图像,提取到各行的边缘位置点,然后对所有边缘位置点进行线性拟合求得刃边倾角.

2.2 ESF 的提取方法

ESF 的提取准确度关系到后续 LSF、MTF 的计算准确度,因此,如何更加准确地根据采集到的倾斜刃边图像提取 ESF 对于保证 MTF 的测试准确度是十分重要的.目前,ESF 的提取方法主要分为两种:一种是直接对刃边区域内的各行数据进行处理^[5];另一种是利用函数模型拟合离散数据获得 ESF^[13]. ISO 12233 倾斜刃边法的 ESF 处理就是采用第一种方法,利用倾斜刃边与扫描方向存在的小夹角形成不同扫描行之间的微小相移特性,解决了传统刃边法 ESF 采样率不足的问题,具体的方法是将刃边区域内所有像素点沿拟合得到的刃边方向投影到垂直于刃边的方向上,取原采样间隔的 1/4 作为新的采样间隔,对每个采样间隔内的像素灰度值取平均,即获得平均上采样 ESF,其像素投影过程如图 2.

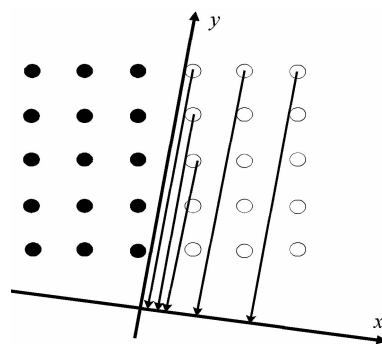


图 2 倾斜刃边法投影示意图

Fig. 2 Diagram of projection of slanted-edge method

但在实际光电成像系统 MTF 的测试过程中由于倾斜刃边图像受到了噪声、盲元的干扰,使用上述 ESF 提取方法时,噪声会导致边缘扩散曲线波动剧烈,盲元会导致边缘扩散曲线出现尖锐的峰、谷,并且在对 ESF 进行差分求 LSF 时会放大噪声的干扰,从而导致系统 MTF 测试的准确度低、重复性差.因此,本文选择利用函数模型拟合离散数据提取 ESF 的方法,并加以改进,提高其 ESF 的提取准确度.函数模型采用具有较强噪声抑制能力的费米函数,考虑到实际的边缘扩散曲线一般是非对称的,使用三个费米函数的线性组合可获得较好的拟合准确度,函数表达式为

$$F(x) = \sum_{i=1}^3 \frac{a_i}{1 + \exp\left(\frac{x-b_i}{c_i}\right)} + d \quad (9)$$

具体的改进方法为:

1) 将刃边区域内所有的像素点沿刃边方向(图 2 中的 y 轴方向)投影到 x 轴,以在 x 轴上的位置为横坐标,以归一化后的灰度值为纵坐标,可以得到边缘扩散曲线的数据点集;

2) 考虑到采集的刃边图像受噪声、盲元的影响,边缘扩散曲线可能存在较大波动与尖锐的峰、谷,因此,直接利用费米函数拟合的效果不好,可先滤除盲元与噪声较大的点.将边缘扩散曲线分为暗区域和亮区域,分别采用式(10)对其进行处理,即

$$|y_i - \bar{y}_i| \geq k_1 \bar{y}_i \quad (10)$$

式中, \bar{y}_i 是坐标点 x_i 邻域的灰度平均值, $\bar{y}_i = \frac{1}{5} \sum_{j=i-2}^{i+2} y_j$, k_1 值是依据噪声、盲元情况而定的,将满足式(10)的像素点灰度值用邻域的灰度平均值代替,可以有效地滤除盲元和噪声较大的点;

3) 采用非线性最小二乘拟合的方法,对处理后的数据利用费米函数模型拟合得到 ESF,则各像素点的误差 $E_i = |F(x_i) - y_i|$,剔除误差 $E_i \geq k_2 F(x_i)$ 的点, k_2 是根据噪声情况而定的系数,再对上述方法得到的数据进行重新拟合得到最终的 ESF.此 ESF 的提取过程利用了多次去噪的处理方法,可以有效地提高 ESF 的提取准确度.

3 实验测试与分析

3.1 仿真实验

3.1.1 仿真实验的设计

为了分析本文提出的改进倾斜刃边法,设计了仿真实验对本文方法、传统方法^[13]、ISO 12233 方法^[5]和文献[14-15]中提出的改进方法进行了对比测试.在仿真实验中,首先利用 Matlab 软件生成 400×400 像元的理想倾斜刃边图像;将理想倾斜刃边图像与已知的 PSF 进行卷积操作,模拟真实光电成像系统的模糊效

应,PSF 采用高斯函数模拟,其表达式为

$$\text{PSF}(x, y) = \frac{1}{2\pi\delta^2} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{2\delta^2}\right] \quad (11)$$

式中,令 $\delta=0.5$,根据式(3)可以求出倾斜刃边图像的理论 MTF 曲线,并以其作为评价基准;最后,在倾斜刃边图像中加入白噪声.在测试过程中改变倾斜刃边图像的刃边倾角和噪声水平,用图像的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)大小表示,分析各种测试方法受刃边倾角和噪声的影响情况.图 3 为刃边倾角为 9° 、SNR 为 40 dB 的倾斜刃边图像.

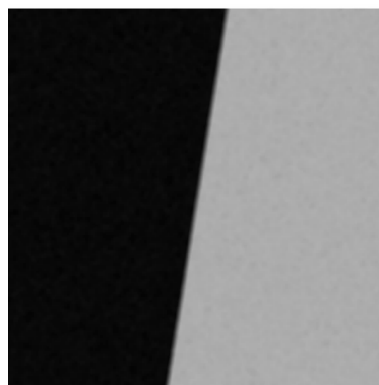


图 3 刃边倾角为 9° 、SNR 为 40 dB 的倾斜刃边图像
Fig. 3 The image of slanted-edge with edge angle of 9° and SNR of 40 dB

3.1.2 刃边倾角测量方法对比

利用刃边倾角为 9° , SNR 分别为 30 dB、40 dB 和 50 dB 的模拟倾斜刃边图像对不同的刃边倾角测量方法进行了对比分析,刃边倾角测量方法主要有文献[10]提出的改进 Hough 变换、文献[11]提出的二维函数拟合、ISO 12233 方法、文献[14]提出的基于梯度与点扩散函数对称性的方法和本文提出的改进 Canny 算子与直线拟合相结合的方法,测量结果与理想刃边倾角 9° 的相对误差见表 1.

表 1 不同刃边倾角测量方法的测量结果

Table 1 The results of different edge angle testing methods

Method	9°		
	30 dB	40 dB	50 dB
Ref. [10]	3.37%	2.86%	2.23%
Ref. [11]	1.24%	1.15%	1.12%
ISO 12233	4.13%	3.08%	2.11%
Ref. [14]	1.09%	1.04%	0.97%
Modified method	0.98%	0.94%	0.92%

文献[10]提出的改进 Hough 变换方法受参量空间人工量化的影响,其刃边倾角测量准确度一般;文献[11]提出的二维函数拟合倾斜刃边图像提取刃边倾角的方法具有较高的测量准确度与抗噪性,但是拟合过程较繁琐;ISO 12233 方法的刃边倾角测量准确度较低,且该方法内包含差分运算,因此测量准确度易受刃

边图像的噪声变化影响;文献[14]提出的刃边拟合方法具有较好准确度与抗噪性,但拟合过程稍显复杂;本文提出的刃边倾角测量方法实现了自动确定 Canny 算子的高低阈值,利用 Canny 算子对阶跃型边缘检测的优异性能和直线拟合相结合提高了刃边倾角的测量准确度与该方法的抗噪性,是一种简洁、高准确度、抗噪性良好的刃边倾角测量方法。

3.1.3 MTF 测量方法对比

利用仿真实验对比分析本文提出的改进倾斜刃边法、ISO 12233 方法、文献[13]提出的传统方法和文献[14-15]中提出的改进方法的 MTF 测量效果,主要从 MTF 测量准确度、测量重复准确度和测量准确度受刃边倾角、噪声变化影响程度这几个方面评价。首先,生成 100 幅刃边倾角为 9° 、SNR 为 40dB 的倾斜刃边图像,每幅图像的白噪声分布有所不同,利用以上 5 种 MTF 测试方法对倾斜刃边图像进行测试,MTF 的测量准确度表示为

$$\begin{cases} \sigma_{1j} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\nu_{ij} - \nu'_i)^2 / n} \\ \sigma_1 = \sum_{j=1}^m \sigma_{1j} / m \end{cases} \quad (12)$$

式中: $j=1, \dots, m, m=100, \sigma_{1j}$ 表示第 j 次测量的 MTF 测量准确度; ν_{ij} 和 ν'_i 表示测试得到的 MTF 曲线和倾斜刃边图像理论 MTF 曲线相同空间频率点处对应的 MTF 值; n 表示计算时取点的数量; σ_1 表示 m 次测量得到的 MTF 测量准确度平均值,用来表示测试方法的 MTF 测量准确度。MTF 的测量重复准确度可表示为

$$\begin{cases} \sigma_{2j} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\nu_{ij} - \bar{\nu}_i)^2 / n} \\ \sigma_2 = \sum_{j=1}^m \sigma_{2j} / m \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\bar{\nu}$ 表示测试得到的 m 条 MTF 曲线的平均值曲线; σ_2 表示测试方法的 MTF 测量重复准确度。针对刃边倾角为 9° 、SNR 为 40dB 的倾斜刃边图像,5 种 MTF 测试方法的测量结果见表 2。

表 2 不同 MTF 测试方法的测量结果

Table 2 The results of different MTF testing methods

Method	σ_1	σ_2
ISO 12233	0.019 2	0.018 5
Ref. [13]	0.008 6	0.006 3
Ref. [14]	0.006 2	0.004 5
Ref. [15]	0.007 5	0.005 8
Proposed method	0.0049	0.003 1

从表 2 的结果分析可知,相比于 ISO 12233 方法、文献[13]提出的传统方法和文献[14-15]中提出的改进方法,本文提出的改进倾斜刃边法具有较高的 MTF 测量准确度和重复准确度,分别达到了 0.004 9 和 0.003 1。

为了分析每种方法的 MTF 测量准确度受刃边倾角、噪声变化的影响情况,生成两组倾斜刃边图像:第 1 组倾斜刃边图像的 SNR 都是 40 dB,刃边倾角分别为 $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$;第二组倾斜刃边图像的刃边倾角为 10° ,SNR 分别为 30 dB、35 dB、40 dB、45 dB、50 dB。每种条件下的倾斜刃边图像都利用式(12)求取各方法的 MTF 测量准确度,5 种方法的 MTF 测量准确度受刃边倾角、噪声变化的影响分别如图 4、图 5。

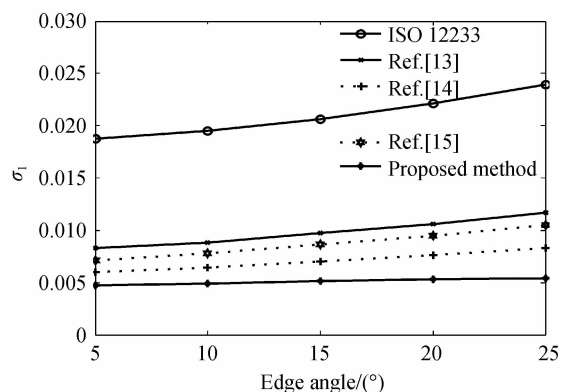


图 4 SNR 为 40dB 时 MTF 测量准确度随刃边倾角的变化
Fig. 4 The results of measurement accuracy of MTF with the change of edge angles at the SNR of 40 dB

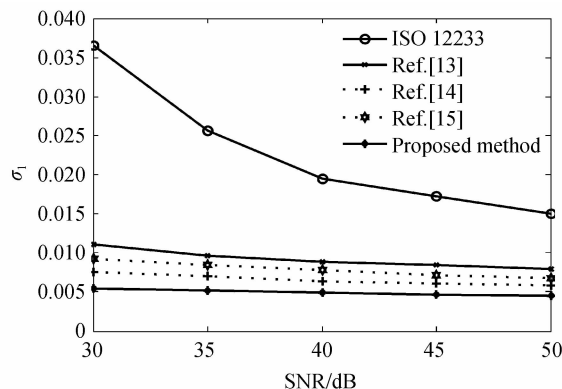


图 5 刃边倾角为 10° 时 MTF 测量准确度随噪声的变化
Fig. 5 The results of measurement accuracy of MTF with the change of SNRs at edge angle of 10°

综合分析图 4、5 的测量结果可知,ISO 12233 方法的 MTF 测量准确度最低,且容易受刃边倾角和噪声变化的影响。其刃边倾角提取过程包含差分运算,导致其易受噪声影响。随着刃边倾角变大,其离散 ESF 的边缘位置获得的投影数据点变少,这会使其处理过程对噪声更加敏感;文献[13]提出的传统方法受刃边倾角和噪声变化影响较弱,但仍受其影响,主要是因为其处理过程包含差分运算,且只是单纯地利用 Fermi 函数拟合 ESF,没有给出有效的降噪措施;文献[15]利用系统传递函数参量模型进行 ESF 的构建,提高了系统 MTF 的测量准确度,但是构建准确度仍受噪声和刃边倾角变化的影响;文献[14]提出了新的刃边拟合方法,并对 ESF 的构建进行了一定程度的去噪处理,使得

MTF 的测量准确度和稳定性有所提高;本文方法利用改进 Canny 算子和直线拟合提取刃边倾角,在进行 ESF 拟合时使用了有效的降噪方法,因此使得本文方法具有较高的 MTF 测量准确度,且基本不受刃边倾角和噪声变化的影响。

3.2 红外成像系统测试

为验证本文提出的改进倾斜刃边法的实用性,在实验室内搭建了由黑体辐射源、靶标、平行光管、红外成像系统等装置组成的实验平台,如图 6。

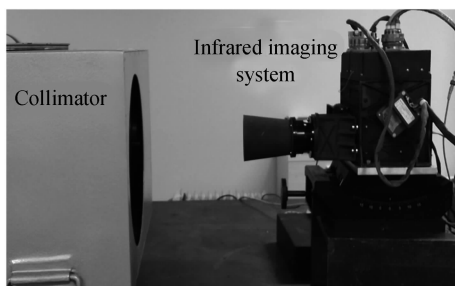


图 6 红外成像系统 MTF 测试装置

Fig. 6 The setup of testing the MTF of infrared imaging system

要准确评价改进倾斜刃边法、ISO 12233 方法、文献[13]的传统方法和文献[14-15]提出方法的 MTF 测量准确度,需要求出红外成像系统的真实 MTF 曲线,并以其作为评价基准.为此,在实验中实测了各光学元件的曲率半径、厚度、装调间隔和光学材料折射率等参量,光学材料折射率的测试过程如图 7。

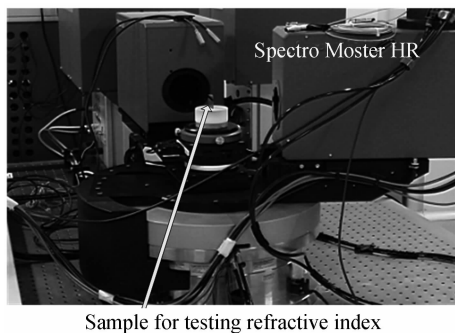


图 7 材料折射率测试

Fig. 7 The testing of material refractive index

将各实测参量带入光学设计软件复算可求出光学系统的 MTF 曲线,探测器的 MTF 曲线可由式(14)计算得到,即

$$MTF_{\text{detector}} = \text{sinc}\left(\frac{f_x}{f_{sx}}\right) \text{sinc}\left(\frac{f_y}{f_{sy}}\right) \quad (14)$$

式中, f_x 和 f_y 为空间频率, f_{sx} 和 f_{sy} 为探测器的采样频率. 则最终可求出红外成像系统的 MTF 曲线,如图 8。

利用阶跃靶标经红外成像系统成像获得倾斜刃边图像,图 9 是红外成像系统采集到的实际倾斜刃边图像,图中虚线包含的范围为选取的 MTF 测试有效区域. 改变靶标的倾角,生成具有不同刃边倾角的倾斜刃

边图像,以图 8 中红外成像系统的 MTF 曲线为基准,利用式(12)可获得不同 MTF 测量方法的 MTF 测量准确度,测试结果见表 3。

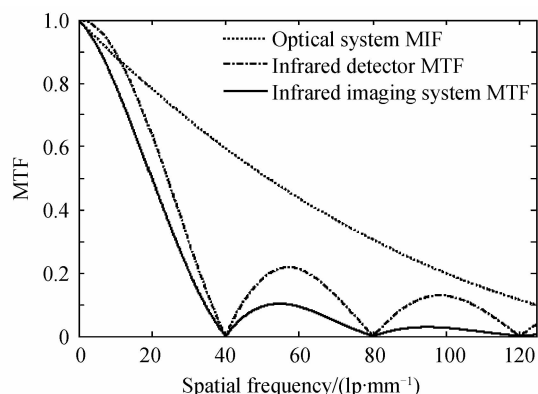


图 8 红外成像系统的 MTF 曲线

Fig. 8 The MTF curve of infrared imaging system

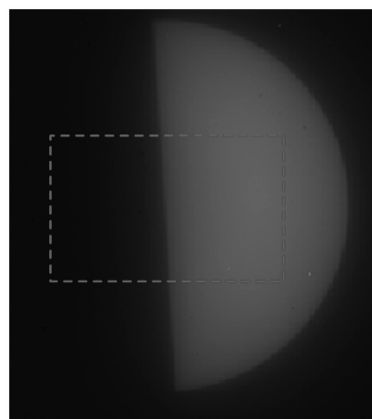


图 9 倾斜刃边图像

Fig. 9 The image of slant edge

表 3 红外成像系统测试中不同 MTF 测试方法的测量结果
Table 3 The results of different MTF testing methods in testing infrared imaging system

Edge angle	σ_1				Proposed method
	ISO 12233	Ref. [13]	Ref. [14]	Ref. [15]	
4.02°	0.018 8	0.008 1	0.005 6	0.006 6	0.004 7
9.53°	0.019 8	0.008 5	0.006 0	0.007 3	0.004 8
14.36°	0.020 7	0.009 2	0.006 7	0.008 0	0.005 0
19.52°	0.022 1	0.009 8	0.007 3	0.008 9	0.005 4

从表 3 的结果分析可知,相比于 ISO 12233 方法、文献[13]提出的传统方法和文献[14-15]提出的改进方法,本文提出的改进倾斜刃边法具有更高的 MTF 测量准确度和较好的稳定性。

3.3 空间遥感图像复原

通常遥感图像的复原过程是通过提取遥感图像的 MTF 来恢复系统的 PSF,并以 PSF 作为系统的退化函数来复原遥感图像. 因此,可以利用对遥感图像的复原效果来间接的评价本文提出的改进倾斜刃边法的性能. 实验中选取某空间光学遥感载荷的遥感图像作为

原图像,如图 10.



图 10 原始遥感图像

Fig. 10 The original remote sensing image

在原图像中加入噪声,并以已知的 PSF 卷积原图像,对原图像进行退化处理后得到的图像如图 11.



图 11 退化遥感图像

Fig. 11 The degenerated remote sensing image

分别利用 ISO 12233 方法、文献[13]的传统方法、文献[14-15]提出的方法和本文提出的改进倾斜刃边法测试退化遥感图像的 MTF,然后利用测试得到的 MTF 估算 PSF,最后,统一使用维纳滤波的方法复原退化的遥感图像.以原始遥感图像为评价基准,利用均方误差 (Mean Squared Error, MSE) 和峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 这两个参量来评价遥感图像的复原效果,见表 4.

表 4 不同 MTF 测试方法的复原效果

Method	MSE	PSNR
ISO 12233	48.751	31.251
Ref. [13]	39.437	32.172
Ref. [14]	34.065	32.887
Ref. [15]	37.184	32.403
Proposed method	31.236	33.184

从表 4 的结果可知,相比于其它 4 种方法,利用本文提出的改进倾斜刃边法获得了较好的遥感图像复原效果,这间接地证明了本文提出的改进倾斜刃边法具有较高的 MTF 测量准确度.

4 结论

针对传统 MTF 测试方法存在的不足,本文提出了

一种改进的倾斜刃边法,主要是利用改进的 Canny 算子与直线拟合相结合提高了刃边倾角的测量准确度与抗噪性,对利用 Fermi 函数拟合 ESF 的过程添加了有效的降噪措施,保证了 ESF 的拟合准确度.利用仿真实验、红外成像系统测试与遥感图像复原等实验验证了本文方法的有效性,实验结果表明:相比于 ISO 12233 方法、文献[13]提出的传统方法和文献[14-15]提出的改进方法,本文方法具有更高的 MTF 测量准确度和重复准确度;同时,本文方法具有较好的抗噪性,且测量结果基本不受刃边倾角变化的影响.

参考文献

- [1] LIU Zhi-ying, DING Qiu-wei, LI Dan, *et al.* Optical design of large aperture and high zoom ratio infrared target simulation system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(4): 0412003. 刘智颖, 丁秋伟, 李丹, 等. 大口径高变焦比红外目标模拟系统的设计[J]. *光子学报*, 2016, **45**(4): 0412003.
- [2] KANG Ji-qiang, HAO Qun, CHENG Xue-min. Measurement and comparison of one-and two-dimensional modulation transfer function of optical imaging systems based on the random target method[J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(10): 104105.
- [3] SEDIGHEH N, KHOSRO M. Measurement of the modulation transfer function of a charge-coupled device array by the combination of the self-imaging effect and slanted edge method[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(19): 4724-4727.
- [4] JEFFREY T O, RICHARD L E, EDDIE L J. Comparison of tilted slit and tilted edge superresolution modulation transfer function techniques[J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(1): 016403.
- [5] Photography-electronic still picture cameras-resolution measurement[S]. ISO Standard 12233: 2000.
- [6] LI Tie-cheng, TAO Xiao-ping, FENG Hua-jun, *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, 冯华军, 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.
- [7] ZHAO Zhan-ping, FU Xing-ke, HUANG Qiao-lin, *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.
- [8] GAO Feng, ZHU Qing-zhen, ZHOU Zhong-xing, *et al.* Accurate measurement of MTF based on interpolation floating method[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2014, **12**(2): 107-116. 高峰, 朱庆阵, 周仲兴, 等. 基于插值数浮动的 MTF 精确测量方法[J]. *纳米技术与精密工程*, 2014, **12**(2): 107-116.
- [9] GONG Shao-run, GAO Feng, YU Ya-jie. Edge measurement for modulation transfer function in digital radiography x-ray imaging system[J]. *Journal of Tianjin University*, 2010, **43**(7): 611-618. 龚绍润, 高峰, 徐雅洁. 数字化 X 射线成像系统 MTF 的刀口测量法[J]. *天津大学学报*, 2010, **43**(7): 107-116.
- [10] ZHU Zhi-liang, LIU Fu-guo, TAO Xiang-yang. An improved slanted-edge method to obtain edge spread function[J]. *Journal of Nanchang University (Engineering &*

- Technology), 2013, **35**(1): 78-82.
- 朱志亮, 刘富国, 陶向阳. 改进的倾斜刃边法获取边缘扩展函数[J]. 南昌大学学报(工科版), 2013, **35**(1): 78-82.
- [11] KENICHIRO M, TAKAYUKI Y, YUKIHIRO N, *et al.* Modified slanted-edge method and multidirectional modulation transfer function estimation[J]. *Optics Express*, 2015, **22**(5): 6040-6046.
- [12] YIN Fang-fang, MARYELLEN L G, KUNIO D. Measurement of the presampling modulation transfer function of film digitizers using a curve fitting technique[J]. *Medical Physics*, 1987, **14**(4): 533-537.
- [13] ALEXIS P T, JONATHAN M M. Measurement of the modulation transfer function of infrared cameras[J]. *Optical Engineering*, 1995, **34**(6): 1808-1817.
- [14] FAN Chong, LI Guan-da, WU Chao-yun, *et al.* High accurate estimation of point spread function based on improved reconstruction of slant edge[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, **14**(11): 1219-1226.
- 范冲, 李冠达, 伍超云, 等. 点扩散函数的改进倾斜刃边重建的高准确度估计[J]. 测绘学报, 2015, **14**(11): 1219-1226.
- [15] LI Jin, XING Fei, WANG Chong. High-precision on-orbit assessment of MTF for space CCD camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(2): 0211003.
- 李进, 邢飞, 王翀. 空间 CCD 相机高准确度在轨调制传递函数估算[J]. 光学学报, 2015, **35**(2): 0211003.