

文章编号 1004-924X(2016)04-0698-11

红外成像系统的调制传递函数测试

李 航^{1,2}, 颜昌翔^{1*}, 于 平¹, 邵建兵¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:研究了刃边法测试光学系统调制传递函数(MTF)的原理, 提出将改进倾斜刃边法用于红外成像系统 MTF 的测量。考虑刃边倾斜角度的测量误差和噪声干扰会引起红外系统 MTF 的测量误差, 采用 Canny 算子、直线拟合和边缘扩散函数(ESF)重构行数变动等方法来提高 MTF 的测试精度; 同时针对 ESF 与线扩散函数(LSF)提出有效的降噪算法来降低噪声对 MTF 测试精度的影响, 从而系统地降低了 MTF 的测量误差。搭建了实验平台, 以红外成像系统的理论模型和实测参数得到的 MTF 曲线为依据, 实验验证了本文方法的有效性, 测试分析了刃边倾角的变化对 MTF 测试精度的影响。实验结果表明: 通过本文方法测试得到的 MTF 曲线的测试精度为 0.010, 测试重复精度为 0.008, 刃边倾角保持在 $2^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 。实验结果显示: 本文方法有效地降低了刃边倾角的测量误差和噪声干扰对 MTF 测试产生的影响, 测试结果具有良好的重复性。

关键词:红外成像系统; 调制传递函数; 刃边倾角测量; 边缘扩散函数; 噪声

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162404.0698

Measurement of modulation transfer function for IR imaging system

LI Hang^{1,2}, YAN Chang-xiang^{1*}, YU Ping¹, SHAO Jian-bing¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: yan cx@ciomp.ac.cn

Abstract: The principles of optical Modulation Transfer Function (MTF) measurement by the edge method for an optical system were researched and an improved inclined edge method for the MTF measurement of an infrared imaging system was proposed. As the edge angle measurement error and noise will cause the MTF measurement error of the infrared system, the Canny operator, line fitting and Edge Spread Function (ESF) reconstruction row number changes were combined to improve the measuring accuracy of the MTF, meanwhile, an effective denoise algorithm for the ESF and the Line Spread Function (LSF) was used to reduce the effect of noise on the MTF measuring accuracy. With the methods mentioned above, the measurement errors of MTF were reduced systematically. An experimental platform was set up. Based on the theoretical model of infrared imaging system and MTF curve obtained by detected parameters, the feasibility of the proposed method was verified and the

收稿日期: 2015-08-06; 修订日期: 2015-10-06.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2011AA12A103); 中国地质调查局科研资金资助项目 (No. 1212011120227)

effect of changed edge angle on the MFT measuring accuracy was analyzed. Experimental results show that the measurement accuracy of MTF curve obtained by the method is 0.010, the measuring repeat accuracy is 0.008, and the edge angle should be kept between 2° and 10° . It concludes that the method effectively reduces the influences of the edge angle measurement error and noise on the MTF measurement, and the measuring results show good measurement repeatability.

Key words: IR imaging system; Modulation Transfer Function (MTF); edge angle measurement; Edge Spread Function (ESF); noise

1 引言

红外成像系统利用红外光学系统将目标与背景的辐射能会聚到红外探测器的光敏面上,探测器将探测到的红外辐射转化为电信号,再经过后续电路处理,最终在输出设备上显示目标的热图像。该系统因具有全天候工作,不易受到干扰等优点,而在警戒、侦查与制导等领域得到了广泛的应用^[1]。调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 用于衡量系统复现场景的能力,它不包含任何信号强度的信息,是用于红外成像系统设计、分析和评价的主要参数,对于检验系统性能是否接近理论设计目标是十分重要的。红外成像系统中常用的 MTF 测试方法主要有两种^[2-4]:一种是基于测量不同空间频率的正弦曲线靶和矩形靶响应的直接测量方法;另一种是基于测量靶标的线扩散函数 (Line Spread Function, LSF), 通过计算其傅里叶变换得到系统 MTF 的间接测量法。间接测量法主要包括狭缝法和刃边法,狭缝法可以很好地抑制系统噪声,MTF 的测试精度高,但是狭缝的制造难度大,测试结果需要依据狭缝的宽度进行修正。对于特定的系统,不恰当的狭缝宽度会对测试结果产生较大的影响。相比于狭缝法,刃边法的测试流程简单、靶标容易加工、通用性较强,因此在医学成像领域的数字化 X 射线成像系统的性能评价与遥感领域的光学遥感器在轨 MTF 测试等方面得到了广泛应用^[5-6]。

然而,刃边法测得的 MTF 易受欠采样效应、刃边倾斜角度的测量误差和噪声的影响而不稳定,测量重复性较差,高频处 MTF 值虚高。针对以上问题,本文在详述了刃边法测试 MTF 原理的基础上,提出了一种适用于红外成像系统 MTF 测试的改进倾斜刃边法,提高了红外成像系统刃边倾斜角度的测量精度,同时针对边缘扩散函数

(Edge Spread Function, ESF)、LSF 分别采用了系统降噪措施。最后搭建了物理实验平台,通过实际测试证明了本文提出的红外成像系统 MTF 测试方法的有效性。

2 改进的倾斜刃边法

2.1 倾斜刃边法测试原理

刃边法测量 MTF 通过红外成像系统对刃边靶标成像,在采集到的图像上选取有效区域得到 ESF,通过对 ESF 微分得到 LSF,最后通过计算 LSF 的傅里叶变换求得红外成像系统的 MTF^[7],其原理如图 1 所示。

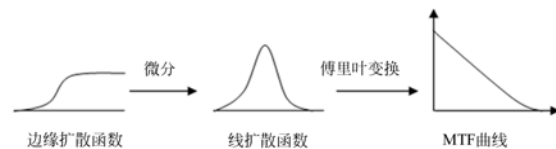


图1 刃边法测试 MTF 原理图

Fig. 1 Principle diagram of MTF measurement by knife-edge method

刃边目标靶可以利用阶跃函数表示:

$$f(x, y) = \text{step}(x) I(y). \quad (1)$$

而 ESF 则等于成像系统的点扩散函数 Point Spread Function, PSF) 与阶跃函数的卷积:

$$\text{ESF}(x) = \text{PSF}(x, y) * \text{step}(x) I(y). \quad (2)$$

依据式(2)可计算系统 PSF 与常量在 y 方向卷积得到 LSF, 再与阶跃函数在 x 方向卷积得到 ESF, 即有:

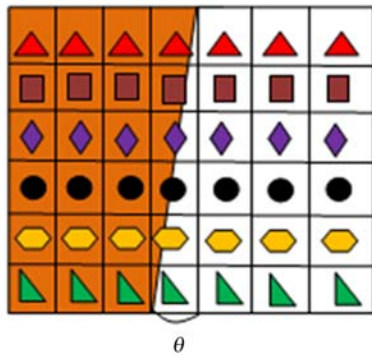
$$\text{PSF}(x, y) * I(y) \text{step}(x) = \int \text{LSF}(x') dx' = \text{ESF}(x). \quad (3)$$

由式(1)~式(3)可知,对 ESF 微分可得 LSF。

由于基于红外焦平面探测器的热成像系统需要采集处于离散位置的像元,必然会限制采样数

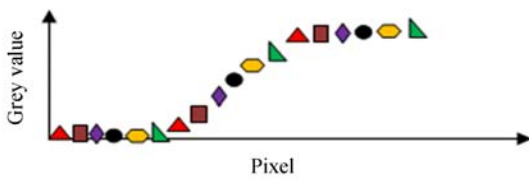
据点的个数,导致 ESF 出现欠采样效应。ESF 的欠采样会导致 MTF 的测试结果失真,因此,设法提高 ESF 的采样率是至关重要的。以小于一个像元的尺寸移动狭缝和相对于探测器倾斜狭缝等方法都可以提高采样率,但考虑使用狭缝测量 MTF 带来的诸多不便,本文选择将刃边目标靶相对于探测器倾斜一定角度放置的方法来提高 ESF 的采样率^[8]。

与垂直于探测器轴线放置刃边目标靶相比,刃边靶倾斜于探测器轴线放置可以显著地提高 ESF 的采样率。如图 2 所示,利用多行数据重构 ESF 要比仅用一行数据表示 ESF 保留下更多的边缘信息,重构行数即为刃边倾斜角度的余切值 $\cot \theta$ 。若 $\cot \theta$ 不是整数,则做取整处理。



(a) 倾斜刃边靶示意图

(a) Diagram of slant knife-edge



(b) 边缘扩散函数

(b) ESF

图 2 倾斜刃边法获取 ESF

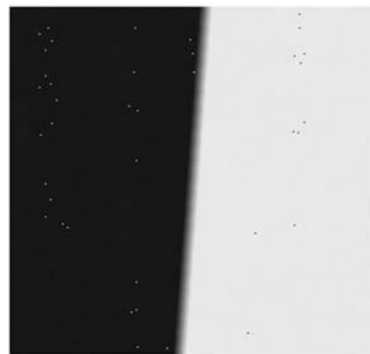
Fig. 2 ESF obtained by slant knife-edge method

2.2 刃边倾角的测量误差与改进

刃边倾斜角度的测量精度直接关系到 ESF 重构行数选择的准确性。刃边倾角的测量误差会导致 ESF 的实际重构行数偏离理想重构行数,造成红外成像系统 MTF 的测试误差。因此,如何提高刃边倾斜角度的测量精度是刃边法测试红外

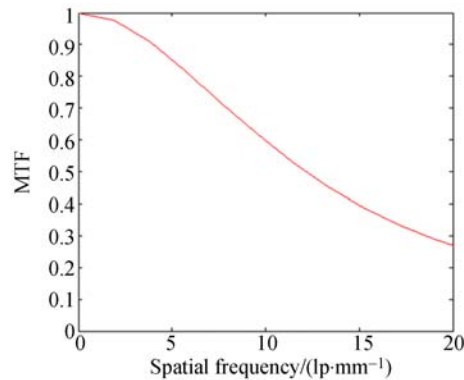
成像系统 MTF 的关键之一。为了分析不同刃边倾角测量方法的精度,本文构建模拟数据进行了仿真实验,并提出了适合于红外成像系统的刃边倾角测量方法。

文中构建了像素尺寸为 $25 \mu\text{m}$,刃边倾斜角度为 4.08° (对应 ESF 重构行数为 14)的模拟刃边图像。为逼近真实红外成像系统的成像过程,将生成的模拟刃边图像与已知的 PSF 进行卷积来模拟红外光学系统的模糊效应,添加了独立同分布的高斯白噪声(信噪比为 30 dB),并在图像中随机生成了数量适当的盲元(无丛生盲元),以构建的模拟数据来分析刃边倾角的测量误差和噪声对红外成像系统 MTF 测试精度的影响,从而改进测试方法。模拟刃边图像及其理论 MTF 曲线如图 3 所示。



(a) 倾斜刃边图像

(a) Image of slant knife-edge



(b) 理论调制传递函数曲线

(b) Theoretical MTF curve

图 3 刃边图像及其理论 MTF 曲线

Fig. 3 Image of slant knife-edge and theoretical MTF curve

现有文献资料中刃边倾角的测量方法主要有两种:一种是利用 Hough 变换检测刃边直线获取倾斜角度;另一种是通过对刃边图像的每行数据求差分得到极值位置,再对极值位置坐标进行直线拟合得到刃边直线,从而获取刃边倾角。Hough 变换是一种常用的直线检测算法^[9],它建立了图像空间与参数空间之间的线-点变换关系,可表示为:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta, 0 \leq \theta \leq \pi, \quad (4)$$

式中: x, y 分别为图像中像素的行、列坐标; ρ 为极径, θ 为极角。Hough 变换的参数空间(T :极角分辨率参数, R :极径分辨率参数)量化得越精细,算法的测量精度越高,但是算法的计算量与存储空间也会越大,这限制了它在快速、精确直线检测方面的应用。相比于 Hough 变换算法,对刃边图像的每行数据求差分然后进行直线拟合的算法计算量较小,不存在测量精度受参数取值精度与范围影响的问题,但是考虑到红外成像系统的特殊性,这里对该方法进行了改进。

红外焦平面探测器不可避免地会出现盲元,虽然经过盲元检测与替换算法的处理,但受算法精度、探测器制作工艺与使用寿命的限制,采集到的红外图像仍会出现盲元。若盲元位置出现在计算 ESF 的刃边图像的有效区域内,对每行数据求差分时会出现多个极值,影响刃边直线的拟合精度。因此,本文首先利用 Canny 边缘检测算子将刃边图像转换成边缘的二值图像,Canny 算子对受白噪声影响的阶跃型边缘是最优的;然后使用最小二乘法拟合出刃边直线获取倾斜角度,从而减弱盲元对测量结果产生的影响。

以构建的模拟刃边图像为分析对象,分别采用上述 3 种刃边直线检测算法测量刃边倾角,对比不同算法的测量精度,并计算其对应的 ESF 重构行数。Hough 变换的结果如图 4 所示,Canny 边缘检测算子提取的刃边图像边缘线如图 5 所示,不同算法的测量结果对比见表 1。

表 1 不同检测算法的测量结果对比

Tab.1 Corresponding results of different testing algorithms

检测算法	Hough 变换 ($T=0.01, R=1$)	差分、直线拟合 合算法	Canny 算子、 直线拟合
刃边倾角/ $^{\circ}$	3.79	3.71	3.93
相对误差/ $\%$	7.11	9.07	3.68

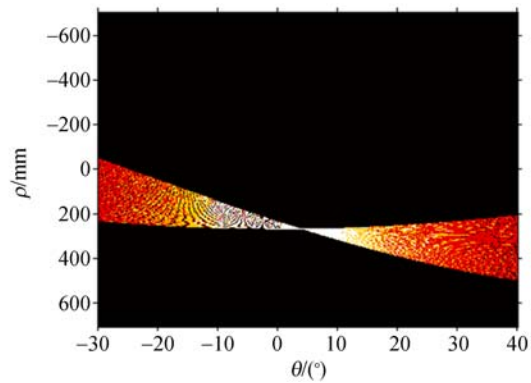


图 4 霍夫变换结果

Fig. 4 Result of Hough transform

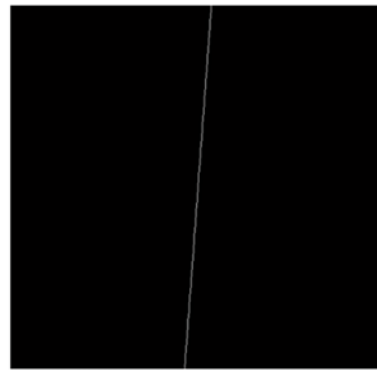


图 5 Canny 算子提取边缘线

Fig. 5 Edge line obtained by Canny

本文提出的刃边直线倾角测量算法相比于其他两种算法具有更高的测量精度。使用 Canny 算子可以更好地减弱盲元对刃边倾角测量的影响;差分法则受图像中盲元现象的影响而产生较大的倾角测量误差。表 1 仅列出了一种参数量化情况下的 Hough 变换结果,其参数量化的选择对运算时间、精度有很大的影响,并不是一种适合快速、精确提取刃边倾角的方法。本文方法测试所得的刃边倾角 3.93° 对应的 ESF 重构行数为 15。分析它与 ESF 重构行数为 14 以及理论 MTF 曲线的偏差,采用文中 2.3 节的降噪方法进行降噪处理,结果如图 6 所示。

由图 6 曲线对比可知,相比于理论 MTF 曲线,刃边倾角真实值为 4.08° 对应的重构行数为 14 的 MTF 曲线值略低,其原因是受 MTF 测试算法与噪声的影响。而经 Canny 算子与直线拟合测得重构行数为 15 的 MTF 曲线值低于重构行数为 14 的 MTF 曲线值,说明刃边倾角的测量误差造成了 ESF 的实际重构行数偏离理想重构

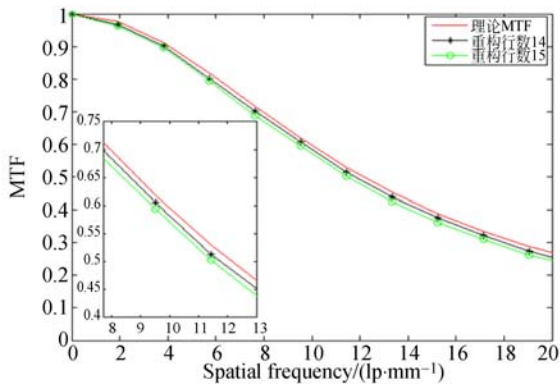


图 6 MTF 曲线对比

Fig. 6 Comparison of MTF curves

行数,导致了 MTF 的测试误差。为了进一步提高 MTF 的测试精度,在 Canny 算子、直线拟合方法测试出刃边倾角的基础上,提出使用 ESF 重构行数变动的方法,即利用边缘检测算法求出刃边倾角对应的 ESF 重构行数后,在此数值基础上分别计算其附近不同重构行数对应的 MTF 曲线^[10]。图 7 为计算得到的重构行数分别为 13, 14, 15, 16, 17 对应的 MTF 曲线。

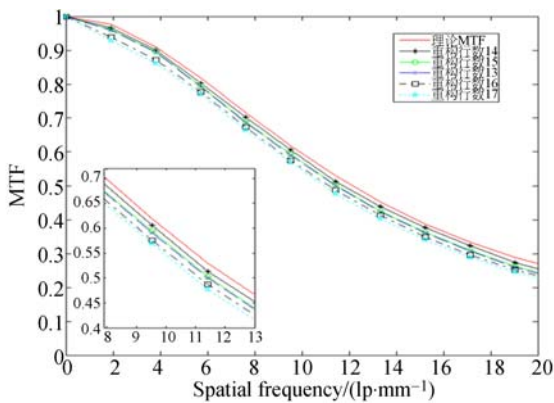


图 7 MTF 曲线对比

Fig. 7 Comparison of MTF curves

通过对比图 7 中各重构行数对应的 MTF 曲线,重构行数为 14(对应刃边倾角的真实值为 4.08°) 的 MTF 曲线最接近理论 MTF 曲线,重构行数偏离 14 越大,MTF 测试误差越大,说明实际重构行数偏离理论重构行数越大,MTF 的测试误差也越大。因此,先利用 Canny 算子与直线拟合方法测量刃边倾角,求出相对应的 ESF 重构行数;然后,以此重构行数为基准设定合适的变动范围,采用相同的降噪算法计算不同 ESF 重构行数

对应的 MTF 曲线,选择曲线包络面积最大的,即可获得红外成像系统的 MTF 曲线。该方法测试流程简单,易于程序化处理,同时保证了 MTF 的高精度测试。

2.3 ESF 与 LSF 的降噪算法

为了消除噪声对红外成像系统 MTF 测试精度的影响,这里针对红外成像系统的特点分别对 ESF、LSF 提出了相应的降噪算法。

2.3.1 ESF 的降噪算法

首先考虑红外成像系统中盲元对提取 ESF 曲线的影响,以刃边实际倾角 4.08° 对应的 ESF 重构行数 14 为例,在模拟刃边图像中选取左右各 50 列数据作为有效区域,则过采样得到的 ESF 曲线如图 8 所示。盲元导致 ESF 曲线出现尖锐的峰或谷,从而影响 MTF 的测试精度。

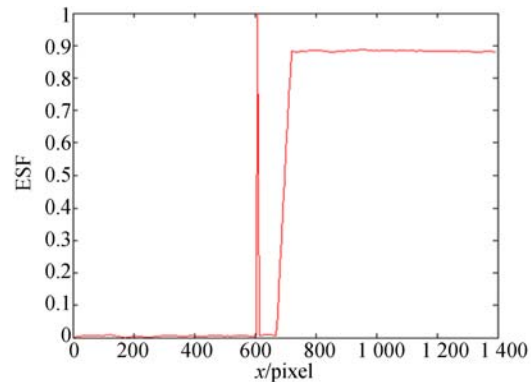


图 8 过采样得到的 ESF 曲线

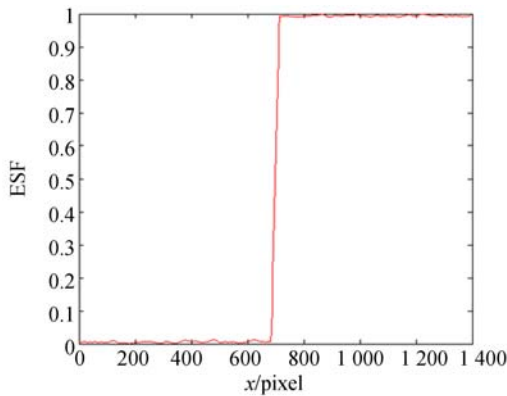
Fig. 8 ESF curve for oversampling

利用中值滤波算法对刃边图像进行滤波处理^[11]。中值滤波是一种基于排序统计理论的能有效抑制噪声的非线性滤波技术。该算法不仅可



(a) 倾斜刃边图像

(a) Image of slant knife-edge



(b)ESF 曲线

(b) ESF curve

图 9 中值滤波处理后的刃边图像及 ESF 曲线

Fig.9 Image of slant knife-edge and ESF curve after median filtering

以滤除孤点噪声,而且可以保持刃边图像的边缘特性,不会使图像产生模糊。中值滤波处理后的刃边图像及过采样得到的 ESF 曲线如图 9 所示。

确定了 ESF 的重构行数后,在选取的刃边有效区域内可重构多条过采样的 ESF 曲线,将多条 ESF 曲线求平均可以显著降低随机噪声的干扰。以刃边遮挡区和透光区各自的平均值为基准,可以定量分析上述算法的降噪效果。对多条过采样 ESF 曲线求平均,可知遮挡区域的均方差由 0.54 减小到 0.22,透光区域均方差由 0.45 减小到 0.18。

2.3.2 LSF 的降噪算法

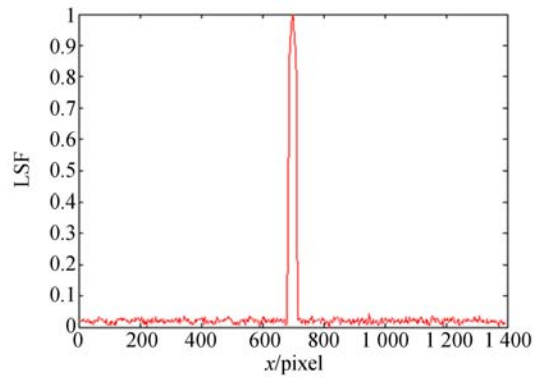
ESF 经降噪处理后,可由离散的 ESF 直接差分得到 LSF,如图 10(a)所示。实际的边缘扩散函数叠加了噪声的干扰,可由下式表示:

$$f'_{ESF}(t) = f_{ESF}(t) + f_{NOISE}(t), \quad (5)$$

从而系统实测的 MTF 值可由下式得到:

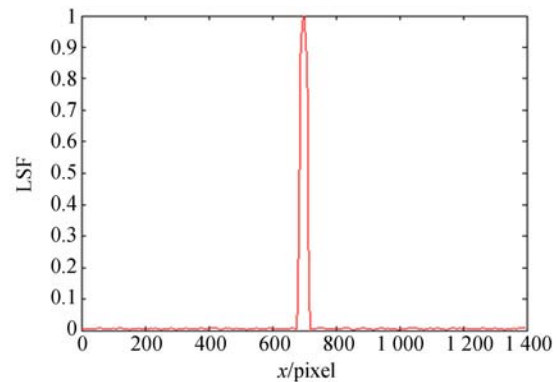
$$\mathcal{F}\left\{\frac{d}{dt}f'_{ESF}(t)\right\} = F_{LSF}(j2\pi f) + j2\pi f F_{NOISE}(j2\pi f), \quad (6)$$

即系统 MTF 值等于 $|F_{LSF}(j2\pi f) + j2\pi f \cdot F_{NOISE}(j2\pi f)|$ 。由此可知,对 ESF 的空域差分运算会增加噪声对系统 MTF 测试的影响,噪声项系数 f 表明噪声的影响随着频率的增加而增加,因此需要对 LSF 曲线进行平滑处理降噪。本文采用 5 点加权移动平滑滤波的方法,滤波结果如图 10(b)所示。



(a) 平滑处理前的线扩散函数

(a) LSF before smoothing



(b) 平滑处理后的线扩散函数

(b) LSF after smoothing

图 10 线扩散函数曲线

Fig.10 LSF curves

3 实验测试及分析

3.1 实验装置

红外成像系统 MTF 的测试装置主要由黑体辐射源、靶标、平行光管、红外光学镜头、红外焦平面探测器及数据采集与存储系统组成,如图 11 所示。

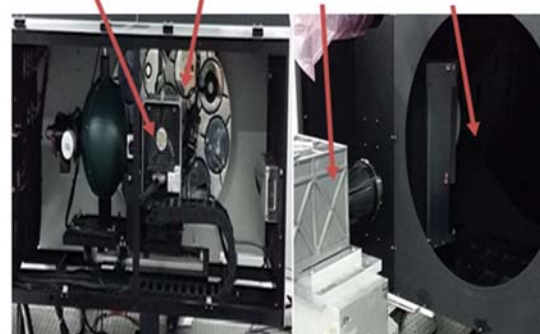


图 11 MTF 的测试装置

Fig.11 Experimental devices for MTF measurement

示。其中,平行光管的口径、焦距皆远大于红外光学系统,此时,平行光管对系统 MTF 的影响可以忽略不计^[12]。整个测试系统固定在隔振平台上,可将机械振动造成的影响降到最低。

3.2 红外成像系统的 MTF 理论模型

在分析了红外成像系统 MTF 理论模型的基础上,实测了红外光学系统的各项参数,将得到的红外成像系统 MTF 曲线作为验证本文方法的依据。系统总的 MTF 等于各单元环节 MTF 的乘积^[13-14],则由红外光学系统与红外焦平面探测器构成的红外成像系统的 MTF 为:

$$MTF_{\text{sys}}(f) = MTF_{\text{diff}}(f) MTF_{\text{aber}}(f) MTF_{\text{det}}(f). \quad (7)$$

红外光学系统的 MTF 由衍射、像差 MTF 两部分组成,圆形孔径光学系统的衍射 MTF 为:

$$MTF_{\text{diff}}(f) = \frac{2}{\pi} \left[\arccos \left(\frac{f}{f_c} \right) - \left(\frac{f}{f_c} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2} \right], \quad (8)$$

式中: f 表示空间频率; f_c 为衍射截止频率, $f_c = D/\lambda$, D 为光学系统的入瞳直径, λ 为中心波长。

红外光学系统的像差 MTF 为:

$$MTF_{\text{aber}}(f) = \exp[-2(\pi\sigma f/f_s)^2], \quad (9)$$

式中: f_s 为光学系统的焦距, σ 为光学系统的弥散斑半径。

矩形像元的红外焦平面探测器 MTF 为:

$$MTF_{\text{det}}(f) = \text{sinc}(DAS \cdot f), \quad (10)$$

式中: DAS 为探测器角弦, $DAS = d/f_s$; d 为探测器像元尺寸。

为准确获得红外成像系统的 MTF 曲线,实测了红外光学系统中各镜片的曲率半径、厚度、材料折射率以及装调间隔,图 12 所示为材料折射率测试的照片。经复算可得光学系统的实际入瞳直

径 $D=58.55 \text{ mm}$, $f_s=111.72 \text{ mm}$, $\sigma=8.05 \mu\text{m}$, 红外成像系统的中心波长 $\lambda=4.4 \mu\text{m}$, 探测器的像元尺寸 $d=30 \mu\text{m}$, 带入式(7)~式(10)可得红外成像系统的 MTF 曲线,如图 13 所示。

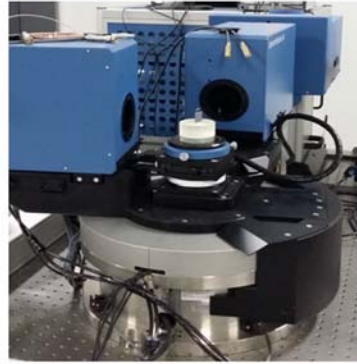


图 12 材料折射率测试

Fig. 12 Photo of material refractive index test

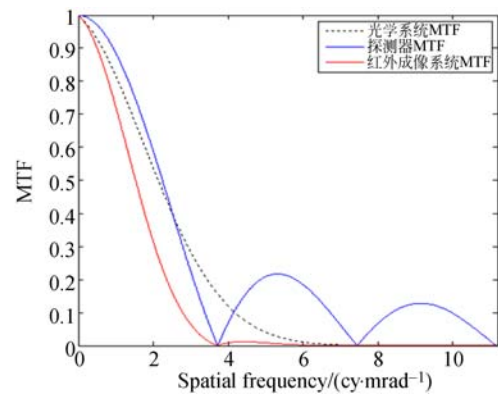
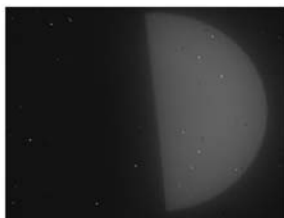


图 13 系统 MTF 曲线

Fig. 13 MTF curves of test system

3.3 实验测试

为验证本文提出的改进倾斜刃边法的有效性,针对红外成像系统采集到的倾斜刃边图像进行了 MTF 测试。图 14(a) 为红外成像系统采集



(a) 倾斜刃边图像

(a) Image of slant knife-edge



(b) 刃边图像有效区域图

(b) ROI of knife-edge image



(c) Canny 算子提取边缘线

(c) Edge line obtained by Canny

图 14 实测倾斜刃边图像

Fig. 14 Images of tested slant knife-edge

到的实际倾斜刃边图像,图 14(b)为在倾斜刃边图像中截取的有效区域,图 14(c)为经 Canny 算子提取的边缘线。

采用文中 2.2 节提出的刃边倾角测量算法,测得红外图像中的刃边倾角为 6.02° ,对应的 ESF 重构行数为 9。以 9 行为基准利用重构行数变动的方法计算 ESF 重构行数为 7,8,9,10,11 时的 MTF 曲线,全部采用 2.3 节提出的降噪算法。经对比计算可知 ESF 的最佳重构行数为 10 (其对应的 MTF 曲线包络面积最大),以它对应的 MTF 曲线作为红外成像系统的实测 MTF 曲线。根据光学系统的实测参数可知,红外成像系统的 Nyquist 频率为 1.86 cy/mrad ,因此截取图 13 中红外成像系统 MTF 曲线的空间频率 1.86 cy/mrad 之前的部分作为参考依据与实测 MTF 曲线进行对比,如图 15 所示。

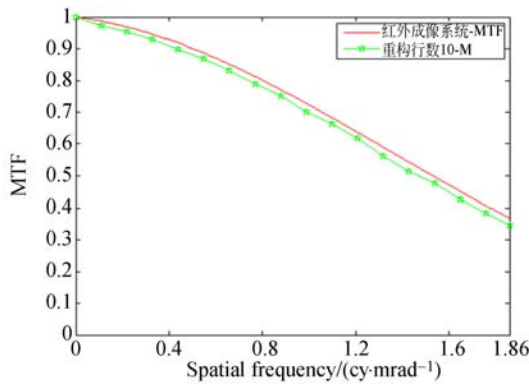


图 15 MTF 曲线对比

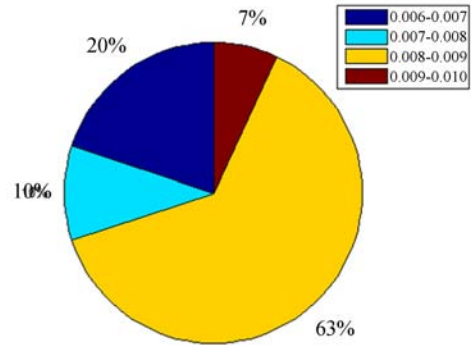
Fig. 15 Comparison of MTF curves

为了更精确地、定量地评价本文提出的方法,针对采集到的红外图像进行了 100 次 MTF 测试,计算本文方法的测试精度与重复精度。分别以红外成像系统 MTF 曲线、100 次 MTF 测试曲线的平均值为基准,以 100 次测试中相对于各自基准的最大均方差数值作为本文方法测试精度与重复精度的评价量,测试精度与重复精度分别利用式(11)和式(12)求取。经计算本文方法的测试精度为 0.010,重复精度为 0.008,图 16 列出了 100 次 MTF 测试曲线相对于各自基准的均方差分布情况。

$$\max_j \left[\sqrt{\frac{\sum_{i,j} (x_{i,j} - y_i)^2}{n}} \right], \quad (11)$$

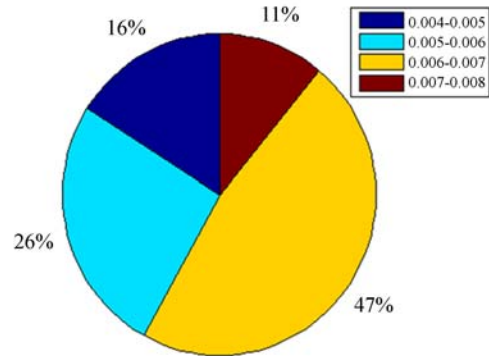
$$\max_j \left[\sqrt{\frac{\sum_{i,j} (x_{i,j} - \bar{x}_i)^2}{n}} \right], \quad (12)$$

式中: $i=1, \dots, n$, 为每条 MTF 曲线上的取点数目; $j=1, \dots, 100$, 代表测试次数; y_i 代表红外成像系统的理论 MTF 曲线值; \bar{x}_i 代表 100 条 MTF 测试曲线的平均曲线值。



(a) 测试精度分布

(a) Distribution of measurement accuracy



(b) 重复精度分布

(b) Distribution of repeatability

图 16 测试精度与重复精度分布

Fig. 16 Distribution of accuracy and repeatability

3.4 刃边倾角变化对 MTF 测试精度的影响

倾斜刃边法可以很好地解决 ESF 采样率不足的问题,但为了更加精确地指导实验室红外成像系统 MTF 测试过程中刃边倾斜角度的选择,本文利用提出的改进方法对不同刃边倾角的红外图像进行了 MTF 测试,以分析不同刃边倾斜角度对 MTF 测试精度的影响。图 17 所示为不同刃边倾角下的红外图像,刃边倾角经本文方法实测得到。

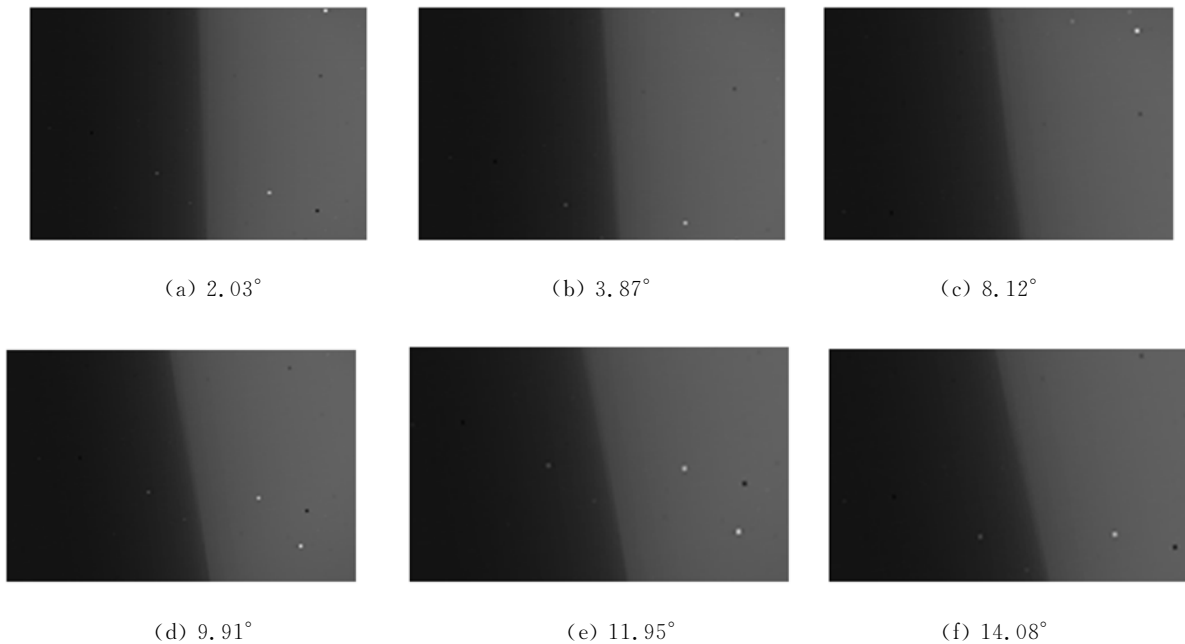


图 17 不同刃边倾角图像

Fig. 17 Images at different slant angles

采用跟文中 3.3 节刃边倾角为 6.02° 的红外图像相同的处理方法,对每一刃边倾角的红外图像进行 100 次 MTF 测试,不同刃边倾角对应的 MTF 测试精度如表 2 所示。

表 2 不同刃边倾角对应的 MTF 测试精度
Tab. 2 Measurement accuracies of MTF at different slant angles

刃边倾角/ $^\circ$	MTF 测试精度
2.03	0.013
3.87	0.009
6.02	0.010
8.12	0.009
9.91	0.011
11.95	0.019
14.08	0.021

通过对比不同刃边倾角情况下 MTF 的测试精度可知:在刃边倾角为 2.03° 时,MTF 测试精度开始下降,其原因是小角度刃边倾角对应的 ESF 重构行数较多;而受红外焦平面探测器尺寸的限制,选取的测试 MTF 的有效区域内像元数量有限,若单条重构的 ESF 曲线占用行数较多,则有效区域内可重构的 ESF 曲线的总量较少,这不利于 ESF 的降噪,进而导致 MTF 测试精度降低。当刃边倾角大于 10° 时,MTF 测试精度的下

降趋势更加明显,其原因是刃边倾斜角度过大则单条重构的 ESF 曲线对应的行数较少,导致重构的 ESF 曲线采样率不足,没有保留下足够的边缘信息。因此,较理想的刃边倾角应在 2° 到 10° 之间,此角度范围内本文方法的 MTF 测试精度基本稳定,可以满足测量需求。

4 结 论

本文基于倾斜刃边法原理提出了针对实验室红外成像系统 MTF 测试的改进倾斜刃边法。该方法通过对倾斜刃边图像的 Canny 算子提取与直线拟合可得到一个精度较高的刃边倾角,消除了红外焦平面探测器盲元对刃边倾角测量产生的影响。然后选取合适的 ESF 重构行数进一步提高了 MTF 的测试精度。最后针对 ESF 与 LSF 分别提出了简洁、有效的降噪算法,很好地降低了噪声对 MTF 测试精度的影响,并通过实验验证了该方法的有效性。实验结果表明,刃边倾角为 6.02° 的红外图像 MTF 的测试精度与重复精度分别为 0.010 与 0.008,说明该方法的测试精度较高,重复性良好。通过实际测量和分析不同刃边倾角的红外图像后发现刃边倾角应在 $2^\circ \sim 10^\circ$ 之间选取较为适宜。此时,MTF 测试具有稳定的精度。该方法具有测试精度高、重复性好、易于程

序化处理等优点。下一步工作将着力实现软、硬件上的自动化处理,并扩展该方法的应用范围。

参考文献:

- [1] 骆守俊,夏寅辉,杨宁宁,等.扫描型长波红外连续变焦光学系统[J].中国光学,2015,8(1):107-113.
LOU SH J, XIA Y H, YANG N N. Long-wavelength infrared continuous zoom scanning optical system[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 107-113. (in Chinese)
- [2] 董建婷,陈伟,史漫丽.基于刃边法的MTF实时测试技术实现[J].计算机测量与控制,2013,21(2):349-351.
DONG J T, CHEN W, SHI M L. Implementation of MTF real-time test with knife-edge method [J]. *Computer Measurement & Control*, 2013, 21(2): 349-351. (in Chinese)
- [3] 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.
BIAN J, MA D M, SUN G, *et al.*. MTF test technology analysis of infrared electro-optical imaging system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(5):748-753. (in Chinese)
- [4] 李旭东,惠渭生,胡铁力,等.红外热成像系统调制传递函数(MTF)测试研究[J].应用光学,2006,27(4):323-326.
LI X D, HUI W SH, HU T L, *et al.*. Research on MTF measurement for thermal imaging systems [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(4): 323-326. (in Chinese)
- [5] 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.
ZHAO ZH P, FU X K, HUANG Q L, *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. (in Chinese)
- [6] 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):611-618.
GONG SH R, GAO F, XUN Y J. Edge measurement for modulation transfer function in digital radiography x-ray imaging system [J]. *Journal of Tianjin University*, 2010, 43(7): 611-618. (in Chinese)
- [7] 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.
LI T CH, TAO X P, FENG H J, *et al.*. Modulation transfer function calculation and image restoration based on slanted-edge method [J]. *Acta Optical Sinica*, 2010, 30(10): 2891-2897. (in Chinese)
- [8] 常松涛,孙志远,张尧禹,等.基于点扩散函数的小目标辐射测量[J].光学精密工程,2014,22(11):2879-2887.
CHANG S T, SUN ZH Y, ZHANG Y Y, *et al.*. Radiation measurement of small targets based on PSF [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2779-2887. (in Chinese)
- [9] 滕今朝,邱杰.利用Hough变换实现直线的快速精确检测[J].中国图象图形学报,2008,13(2):234-237.
TENG J CH, QIU J. Fast and precise detection of straight line with Hough transform [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(2): 234-237. (in Chinese)
- [10] 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.
GAO F, ZHU Q ZH, ZHOU ZH X. Accurate measurement of MTF based on interpolation floating method [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2014, 12(2): 107-116. (in Chinese)
- [11] 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.
ZHANG X L, DU G H, DENG B, *et al.*. High precision measurement of modulation transfer function for X-ray CCD with knife-edge method [J]. *Acta Optical Sinica*, 2010, 30(6): 1680-1687. (in Chinese)

- [12] 李宁,张云峰,刘春香,等. 1 m 口径红外测量系统的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2054-2060.
LI N, ZHANG Y F, LIU CH X, *et al.*. Calibration of 1 m aperture infrared theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2054-2060. (in Chinese)
- [13] 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): 1-10.
XU B SH, SHI Z L, FENG B. Modulation transfer function measurement method of electro-optical imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1-10. (in Chinese)
- [14] 黄巧林,姜伟. 航天光学遥感器 MTF 测试技术研究[J]. 航天返回与遥感, 2006, 27(4): 33-37.
HUANG Q L, JIANG W. MTF test technology of aerospace optical remote sensor [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, 27(4): 33-37. (in Chinese)

作者简介:



李航(1990—),男,吉林长春人,博士研究生,2012年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事红外成像系统设计与检测方面的研究。E-mail: lihang19900210@126.com

通讯作者:



颜昌翔(1973—),男,湖北洪湖人,研究员,2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail: yancx@ciomp.ac.cn