

# 基于几何投影的线扩展函数算法研究

谢巍<sup>1</sup> 侯丽伟<sup>1</sup> 许春<sup>1</sup> 潘鸣<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; <sup>2</sup> 中国电子科技集团公司第五十研究所, 上海 200063)

**摘要** 线扩展函数测试是光学成像系统成像质量评价中重要的一部分, 线扩展函数测量精度的高低直接影响到系统调制传递函数(MTF)曲线的测量精度。为了提高线扩展函数的测量精度, 提出了一种基于几何投影的线扩展函数测试算法。从算法的原理分析入手, 通过感兴趣区域(ROI)截取、狭缝确认及投影计算, 拟合得到线扩展函数曲线。用中波红外探测器对黑体背景下的狭缝成像来对算法进行验证, 与传统横狭缝测线扩展函数的方法进行对比, 分析非均匀性噪声对测量结果的影响, 最后对算法的误差来源进行了分析。结果表明, 本算法提高了线扩展函数的测量精度, 影响测量误差的主要因素是成像系统的信噪比。

**关键词** 成像系统; 调制传递函数; 线扩展函数; 几何投影; 误差分析

中图分类号 O434.3

OCIS 110.3000 110.3080 100.2550

文献标识码 A

## Line Spread Function Algorithm Research Based on Geometrical Projection

Xie Wei<sup>1</sup> Hou Liwei<sup>1</sup> Xu Chun<sup>1</sup> Pan Ming<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China  
<sup>2</sup> The 50th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Shanghai 200063, China)

**Abstract** The line spread function (LSF) testing is the most important part of image quality assessment of optical imaging system. The measuring precision of LSF straightly affects the modulated transfer function (MTF) curve of system. A LSF testing algorithm based on geometrical projection is proposed to raise measuring precision. The LSF fitting curve is gained by analyzing the algorithm, cutting region of interest (ROI), identifying narrow slit and computing projection. The algorithm is validated by imaging narrow slit with background of a blackbody using a medium wave infrared detector. The results are compared with that using traditional way. The impact of non-uniformity noise on measuring results is analyzed. The main error of the algorithm is analyzed. It is concluded that the algorithm raises the measuring precision and the main factor of measuring error is the signal to noise ratio (SNR) of imaging system.

**Key words** image systems; modulation transfer function; line spread function; geometrical projection; error analysis

## 1 引言

在传统的光学成像系统成像质量评价标准中, 调制传递函数(MTF)是一个重要指标。调制传递函数的测量方法主要是测系统的边沿扩展函数(ESF)和线扩展函数(LSF), 因为边沿扩展函数求导得到系统的线扩展函数, 对线扩展函数做傅里叶变换并归一化就是系统的调制传递函数。因此通过改进线扩展函数的测试算法提高其测量精度, 可以间接提高系统调制传递函数的测量精度, 对确定成像系统像质有重要意义。

对于在轨卫星或光学成像系统外场成像过程中成像质量评价, 国内外普遍采用脉冲法来获取线扩展函数, 采用刃边法来获取边沿扩展函数。不管是脉冲法还是刃边法, 一般要求目标物(或特征物)与成像系统的探测器阵列方向成一定的微小夹角<sup>[1~9]</sup>(通常情况下角度不会大于10°), 以获取更高的采样精度, 角度过大将会对测试结果造成影响。实验室中常用的线扩展函数测试方法是将系统通过平行光管对横狭缝、竖狭缝成像, 这样容易引起采样不足, 影响测量精度。几何投影方法可以对0°~90°之间任意角度所成图像进行分析, 不管是实验室

收稿日期: 2010-07-25; 收到修改稿日期: 2010-10-26

作者简介: 谢巍(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事光学系统成像质量评价等方面的研究。E-mail: xawit@163.com

导师简介: 许春(1968—), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事天体物理方面的研究。E-mail: chun.xuu@gmail.com

条件下的性能测试还是外场成像测试都能达到较高的测试精度。对于几何投影算法,目前仅见于 Kohm<sup>[10]</sup> 的讨论,主要应用在边沿扩展函数。本文对几何投影在线扩展函数测试中的应用进行了分析,通过实验验证了算法的可行性,对比传统测量方法可以看到其测量精度大大提高,最后对测量误差进行分析,根据结果提出了一些应用推广的方法。

## 2 算法原理

### 2.1 前提条件

为了保证测试结果的准确性,本算法计算的前提条件有 3 点:

- 1) 目标狭缝或边沿与探测器阵列方向成任意一定角度,如前所述,0°或 90°即实验室常用的横、竖狭缝测线扩展函数;
- 2) 目标狭缝或边沿需为直线,近似直线的目标可以通过拟合获得,但计算结果的精度影响较大;
- 3) 目标狭缝或边沿的亮度分布均匀。

### 2.2 算法

本算法首先截取线扩展函数所在区域,通过对狭缝进行直线拟合,获得直线在探测器像元坐标系内的直线方程参数,在感兴趣区域(ROI)内计算每个像素点到直线的投影距离,以此距离作为拟合线扩展函数时的投影位置,截取适当的投影位置得到足够用于拟合的有效数据点,最后对数据进行拟合。

#### 2.2.1 ROI 截取

对高分辨率相机进行测试时,不可能对整幅图像来做分析,所以需要将 ROI 截取出来。如图 1 所示,为了显示需要,将原图进行取反处理。图 1(b)外围虚线框示意图像边沿,内侧虚线矩形框即 ROI。为了计算方便,目标狭缝图像与 ROI 矩形框的 2 个交点需在矩形框的竖直边之上(如图 1 所示,交点落在矩形框水平边上的图像可以通过改变矩形框形状或旋转 90°来计算)。

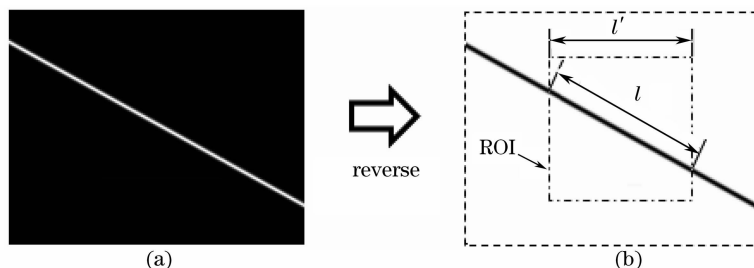


图 1 (a) 原始图像, (b) 取反后的图像和 ROI  
Fig. 1 (a) Original image, (b) reversed image and ROI

#### 2.2.2 狭缝确认

ROI 截取后,需要确认狭缝的位置和角度。取 ROI 左上角为坐标原点,ROI 坐标与原图坐标可以通过简单的平移变换实现。在 ROI 中,从左至右把每一列中灰度值最大点标记出来,对这些点进行直线拟合,得到  $y = kx + b$ ,考虑到实验中探测器盲元有可能出现在 ROI 中,直线拟合算法不采用常见的最小二乘法,而是 Bisquare 方法,这样可以有效剔除拟合数据中的异常点。直线拟合精度与 ROI 截取的狭缝长度  $l$  密切相关。

#### 2.2.3 投影计算

投影算法原理如图 2 所示。狭缝在前一步得到确认,它的位置和角度由拟合直线方程  $y = kx + b$  确定。构造一条垂直于狭缝的直线,将狭缝周围像素点如  $P(x_i, y_i), Q(x_j, y_j)$  投影到该直线上。投影算法即计算像素点到狭缝的距离  $d$ ,容易得到

$$d = (kx + b - y) / \sqrt{1 + k^2}. \quad (1)$$

当像元在直线上时  $d = 0$ ,当像元位于直线上方时  $d > 0$ ,当像元位于直线下方时  $d < 0$ , $d$  的单位为 1 个像元宽度。以像元灰度值为纵坐标, $d$  为横坐标画图便得到线扩展函数数据,对  $|d|$  进行限制(例如  $|d| \leq 5$ ),截取到有效的线扩展函数数据如图 2 所示。

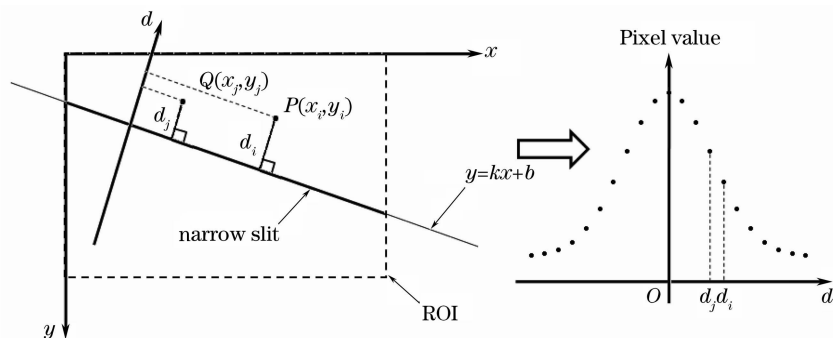


图2 线扩展函数投影技术

Fig. 2 Line spread function projection technique

### 2.2.4 线扩展函数拟合

线扩展函数拟合采用一维的高斯函数进行非线性拟合,可表示为

$$f(x) = A \exp[-(x-m)^2 / (2\sigma^2)] + a_0 + a_1 x, \quad (2)$$

式中  $A$  为幅值,  $m$  为中心点, 与直线方程有关, 如果  $m = 0$ , 则中心在直线上,  $\sigma$  为标准偏差,  $a_0$  为常量,  $a_1$  为 1 阶系数。加入常量是为了扣除均匀背景, 加入 1 次项是为了扣除渐变背景。

## 3 实验验证

本实验采用  $320 \text{ pixel} \times 240 \text{ pixel}$  的中波红外焦平面探测器通过光学系统对以面源黑体为背景的狭缝(狭缝宽度为  $d_0 = 0.3 \text{ mm}$ ) 成像。光学系统焦距  $f = 270 \text{ mm}$ , 口径  $D = 90 \text{ mm}$ , 探测器积分时间  $t = 0.1 \text{ ms}$ , 黑体温度为  $T = 340 \text{ K}$ , 灰度量化等级为 12 bit, 如图 3 所示。

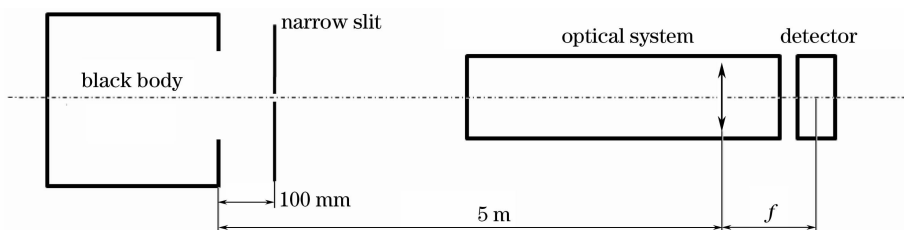


图3 实验设备

Fig. 3 Experimental equipment

图 4 为狭缝所成图像, 以及线扩展函数拟合曲线, 狭缝与水平方向夹角为  $21.284^\circ$ ,  $\sigma$  拟合值为 0.4595。可以看到, 在系统信噪比相对较低的情况下, 本算法依然能较好地拟合出线扩展函数曲线。

针对传统的线扩展函数测试方法做了一个对比实验。在保持其他条件不变的情况下, 将图 4 中的倾斜狭缝水平放置, 如图 5(a) 所示, 图 5(b) 为对应的线扩展函数拟合曲线。可以看到, 横狭缝拟合时存在明显的采样不足, 图 5(c) 对两种狭缝图像放大后的像元分布情况进行了对比。从线扩展函数曲线上看已经横狭缝成像得

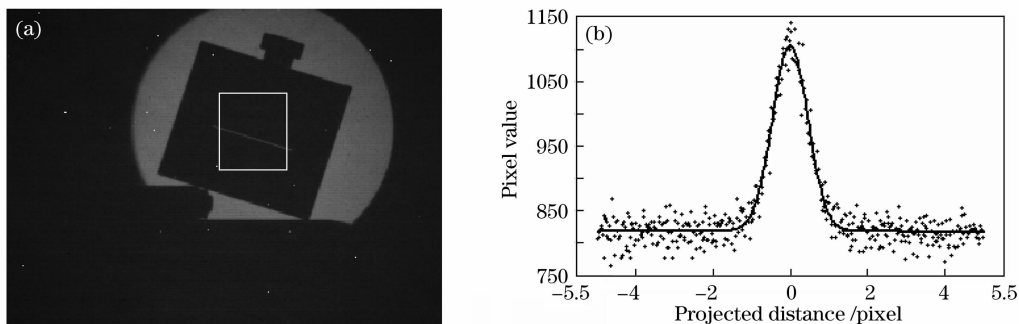


图4 带有 ROI 的狭缝图像(a)及线扩展函数拟合曲线(b)

Fig. 4 Narrow slit image with ROI (a) and LSF fitting curve (b)

到的数据依据不符合高斯拟合的要求,这样的拟合结果偏差很大,这里 $\sigma$ 的拟合值为0.6613。而图4里倾斜狭缝则较好地得到了高斯拟合曲线,它的拟合结果为 $\sigma=0.4595$ 。可以看到传统的横狭缝测量因为采样不足引起的测量误差很大,在本实验中已经接近40%。

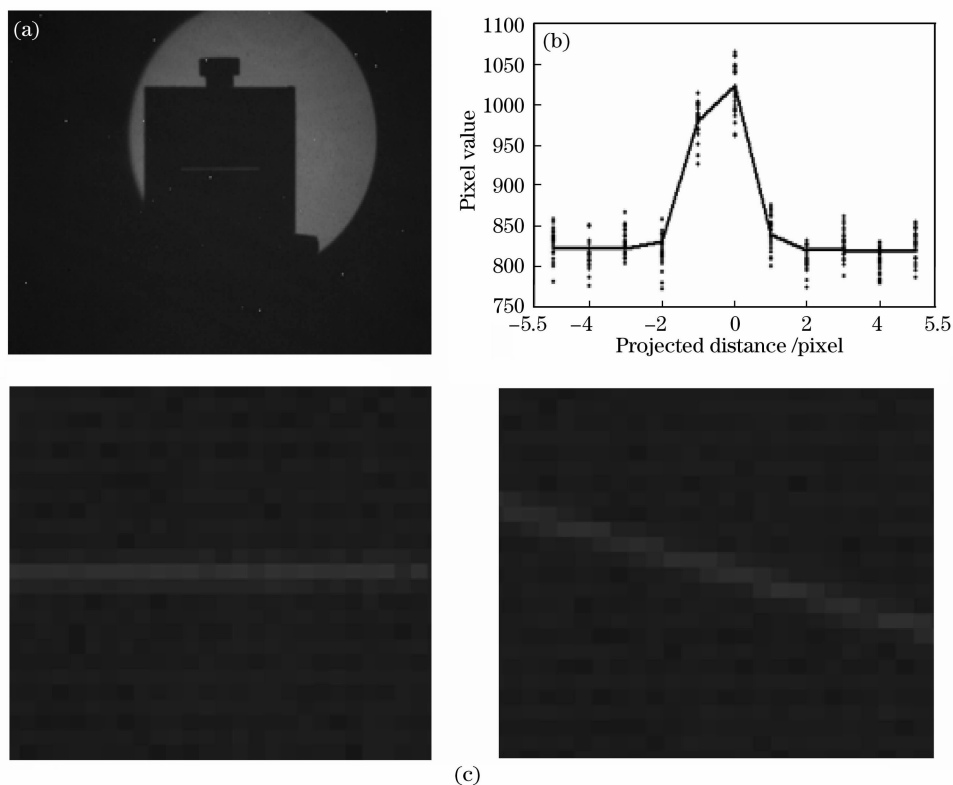


图5 (a)横狭缝图像,(b)线扩展函数拟合曲线和(c)水平狭缝与倾斜狭缝放大图像对比

Fig. 5 (a) Horizontal narrow slit image, (b) LSF fitting curve, (c) comparison of horizontal narrow slit and slanted narrow slit image being magnified

因为红外焦平面探测器存在一定的非均匀性,所以通常在成像后要对图像进行非均匀性校正处理,采用基于黑体定标的两点校正法对图像进行非均匀性校正,图6是对图4所示狭缝图像进行非均匀性校正后的拟合结果。由表1结果对比可知,非均匀性校正前后 $\sigma$ 的变化接近2%,拟合残差在非均匀性校正后大大减小。

表1 非均匀性校正前后高斯拟合参数对比

Table 1 Comparison of Gaussian fitting parameters between original and ununiformity calibrated images

| Fitting parameters | A       | $\sigma$ | m     | $a_0$  | $a_1$  | Residue |
|--------------------|---------|----------|-------|--------|--------|---------|
| Original image     | 290.56  | 0.4594   | 0.016 | 815.95 | -0.329 | 369.795 |
| Calibrated image   | 289.074 | 0.4669   | 0.017 | 808.5  | 0.054  | 21.92   |

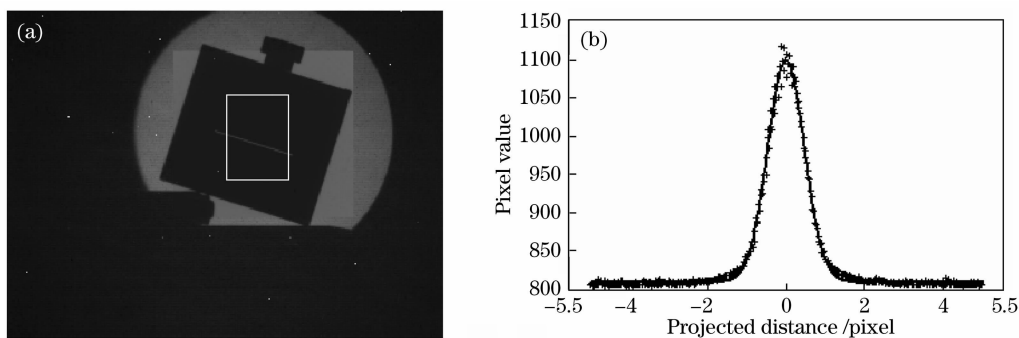


图6 (a)非均匀性校正后图像,(b)线扩展函数拟合曲线

Fig. 6 (a) Ununiformity calibration image and (b) LSF fitting curve

### 4 误差分析

本算法计算结果的误差来源主要有两方面:1) 成像系统噪声引起的误差;2) 拟合算法的误差。成像系统噪声的影响可以对连续采集的多帧图像逐帧计算来获得。图 7 为取连续 340 帧图像做逐帧计算得到的  $\sigma$  与  $k$  结果,其中  $\sigma=0.4594\pm 0.0014, k=0.3148\pm 0.0009$ 。

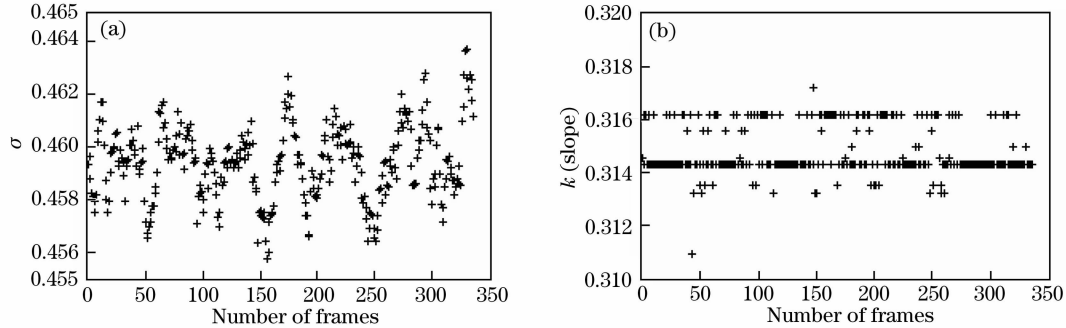


图 7 连续多帧图像的  $\sigma$  (a)及斜率  $k$  (b)

Fig. 7 A series of  $\sigma$  (a) and slope  $k$  (b) with continuous images

拟合线扩展函数的误差也有两方面:1)在狭缝确认过程中拟合直线  $y=kx+b$  引入的误差;2)用高斯函数做非线性拟合的误差。这 2 种误差来源都受系统噪声的影响,所以系统信噪比应该在可接受的范围内,然后才能对拟合误差进行分析。因为由高斯函数拟合引起的误差可以通过优化初始参数来减小,所以这里主要分析直线拟合中引入的误差。

前面已经提到,直线拟合精度与 ROI 截取的狭缝长度  $l$  密切相关。所以为了保证拟合精度,需要在允许的条件下通过 ROI 截取获得足够长的狭缝长度  $l$ 。对于拟合直线  $y=kx+b$ ,当  $l$  一定时,拟合参数斜率  $k$  和截距  $b$  对后续的高斯函数拟合有影响。易知,当  $k$  为某一最优值时,即拟合直线与狭缝完全重合或者与狭缝方向平行,高斯函数拟合将得到一个最小值,即最佳的拟合  $\sigma$  值;截距  $b$  的变化只会影响投影中心位置,而  $\sigma$  值与位置无关,所以  $b$  的变化可以不予考虑。

对于狭缝位置得到确认的图像(即拟合得到方程  $y=kx+b$ ),可以计算当  $k$  在 1% 的摆动范围内变化时(如图 8 所示)  $\sigma$  的变化曲线如图 9 所示,由此来确认  $k$  对  $\sigma$  的影响。图 9 中,  $q$  为直线拟合算法得到的斜率值点,取其  $\pm 1\%$  范围内点得到  $k$  与  $\sigma$  及高斯拟合残差的关系曲线。由曲线可知,  $k$  与  $\sigma$  服从一个近似二次曲线的分布,  $p$  代表最佳高斯拟合点,理想情况下  $q$  与  $p$  应该是同一点,实际系统中噪声的影响使得  $q$  与  $p$  存在一定误差,  $q$  与  $p$  的距离与系统信噪比成反比,当系统信噪比较低

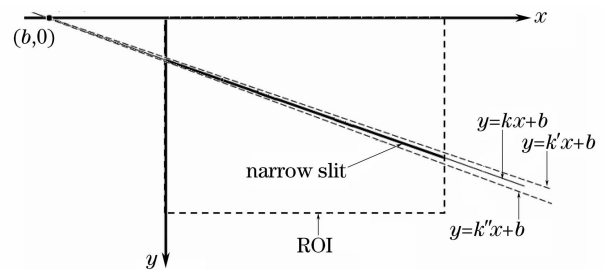


图 8  $k$  变化示意

Fig. 8 Sketch map of  $k$  change

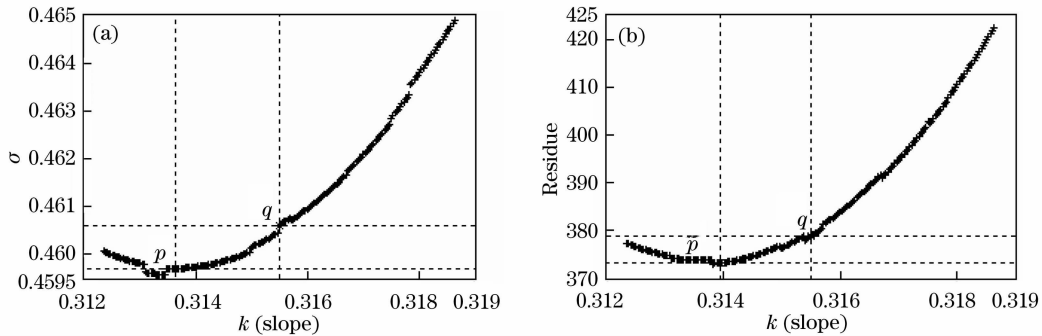


图 9  $\sigma$  (a)及残差(b)随  $k$  的变化曲线

Fig. 9  $\sigma$  (a) and fitting residue (b) curve with  $k$

时,有必要在获取  $q$  点后通过反复计算来找到  $p$ ,这样带来的结果是大幅增加算法计算量;当系统信噪比较高时, $q$  与  $p$  的差异相对来说是可以忽略的。结合对非均匀性影响的讨论可知,对于红外器件该算法的误差主要是像元之间非均匀性引起的,可见光探测器非均匀性较低,误差来源和整个系统信噪比有很大关系。

## 5 结 论

几何投影法在任意角度方向测量线扩展函数都有较高的精度,它克服了传统测试方法采样不足,以及其他方法对角度限制的问题,为它的应用推广提供了条件。实验室条件下已经实现了基于该算法对光学系统的辅助调焦,以及平台振动对系统像质影响的定量分析。对于卫星图像和外景图像,可以通过在图像中寻找类似狭缝和脉冲边沿的特征目标来进行拟合分析,无需对特定场景成像。

## 参 考 文 献

- 1 D. Helder, T. Choi, C. Anderson *et al.*. On-orbit modulation transfer function (MTF) measurements for ikonos and quickbird[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **88**: 42~45
- 2 Xinhua Cao, H. K. Huang, Shyhliang A. Lou *et al.*. Novel algorithm for measuring the MTF of a digital radiographic system with a CCD array detector[C]. *SPIE*, 2000, **3977**: 580~589
- 3 M. Estrideau, P. Magnan. Fast MTF measurement of CMOS imagers using ISO 12333 slanted-edge methodology[C]. *SPIE*, 2004, **5251**: 243~252
- 4 Tatsuya Yamazaki, Makoto Nokita, Shinsuke Hayashida *et al.*. A method to measure the presampling MTF using a novel edge test device and algorithm[C]. *SPIE*, 2004, **5368**: 696~704
- 5 Beilei Wang, Kenneth Barner, Denny Lee *et al.*. A simple edge device method for determining the presampling modulation transfer function (MTF) of flat field digital detectors[C]. *SPIE*, 2005, **5745**: 1191~1198
- 6 Yen-Hong Kao, Michael Albert, Ann-Katherine Carton *et al.*. A software tool for measurement of the modulation transfer function[C]. *SPIE*, 2005, **5745**: 1199~1208
- 7 Tiecheng Li, Huajun Feng, Zhihai Xu *et al.*. Comparison of different analytical edge spread function models for MTF calculation using curve-fitting[C]. *SPIE*, 2009, **7498**: 74981H
- 8 Jonathan D. Fanning, Srikant K. Chari, Carl E. Halford *et al.*. Using a rotating test pattern for MTF measurement of staring array sensors[C]. *SPIE*, 2004, **5407**: 253~262
- 9 Dai Qiyang, Xia Deshen, He Hongyan *et al.*. Performance analysis of MTF measurement using edge method[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2006, **27**(3): 22~27  
戴奇燕,夏德深,何红艳等. 刀刃法在轨 MTF 测量性能分析[J]. *航天返回与遥感*, 2006, **27**(3): 22~27
- 10 K. Kohm. Modulation transfer function measurement method and results for the orbview-3 high resolution imaging satellite [C]. *Proc. ISPRS*, 2004, **20**: 12~13