

一种改进的空间相机在轨调制传递函数检测方法

程莹^{1,2*}, 易红伟^{1,2**}, 刘鑫龙^{1,3}

¹中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710119

摘要 根据空间探测相机在轨工作状态及成像特点, 结合调制传递函数(MTF)常用测试方法, 利用月球边缘刃边法, 对其进行了在轨 MTF 检测。该方法将月球边缘与深空背景形成的高对比度线状边缘图像作为测试目标, 使用仿真手段分析每个环节多种处理方法的计算精度及运行速度, 形成了优化的月球边缘刃边法在轨 MTF 检测流程, 其中在边缘扩展函数(ESF)处理环节, 使用修正的 Savitsky-Golay 滤波器组合双高斯拟合法, 得到了准确的 ESF, 同时有效抑制了噪声。仿真和实验结果表明, 该方法对信噪比高于 30 dB 图像的测试精度达到 0.02, 能实现相机焦面位置和 MTF 的准确标定。

关键词 测量; 调制传递函数; 月球刃边法; 空间相机; 双高斯拟合法

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0704010

Improved Method for On-Orbit Modulation Transfer Function Detection of Space Cameras

Cheng Ying^{1,2*}, Yi Hongwei^{1,2**}, Liu Xinlong^{1,3}

¹*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

³*School of Physics & Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710119, China*

Abstract According to the on-orbit working state and imaging characteristics of cameras for space exploration, the lunar-edge method is used to detect its on-orbit modulation transfer function (MTF), combined with the commonly used test method of MTF. This method uses the high-contrast linear edge image formed by the lunar edge and the deep space background as the test target. The simulation is used to analyze the calculation precision and running speed of various processing methods in each link, forming an optimized process of on-orbit MIT detection based on the lunar-edge method. In the link of edge spread function (ESF) processing, a modified Savitsky-Golay filter combined with double Gaussian fitting method is used to obtain an accurate ESF while effectively suppressing the noise. The simulation and experimental results show that the proposed method has an accuracy of 0.02 for images with a signal-to-noise ratio higher than 30 dB, which can achieve accurate calibration of camera focal plane position and MTF.

Key words measurement; modulation transfer function; lunar-edge method; space cameras; double Gaussian fitting method

OCIS codes 120.6085; 110.4100; 040.1490; 100.3005

1 引言

用于空间目标观测的卫星光学相机(简称空间相机)是人造卫星探测系统的重要组成部分和核心

载荷,其观测对象主要是太空中的各类物体,包括各种恒星及行星、在轨航天器、火箭残骸等空间碎片。它能近距离观测太空环境和空间物体,主要应用于太空探索、天文定位、星体识别、空间碎片检测和回

收稿日期: 2018-11-16; 修回日期: 2019-01-07; 录用日期: 2019-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(61427811)

* E-mail: chengying2015@opt.cn; ** E-mail: yihongwei@opt.ac.cn

收等领域。

受系统装调、长途运输、发射冲击、在轨运行器件和自身元器件老化等因素的影响,空间相机的成像系统性能会逐渐下降,使图像所能提供的信息量变少。因此,需要对卫星成像系统的成像质量进行在轨检测,以监测其性能的变化情况^[1-2]。调制传递函数(MTF)是用于评价光学系统成像质量的重要参数,它能体现待评价光学系统对物体成像期间的信息衰减程度,其精确度较高,比传统像质评价方法更客观全面,是用于空间相机在轨运行性能的理想评价指标^[3-5]。

空间相机在轨运行期间的成像目标为空间中的景物与物体,多为非合作目标,且受成像对象形状及尺寸的限制,难以提供符合 MTF 测试的靶标;而通过卫星调姿观测地面靶标的方式要求卫星平台具备更高的机动能力,增大了技术难度,并且难以进行多次在轨测试。因此,如何在卫星在轨状态不发生较大变化的情况下获取满足 MTF 在轨测试要求的目标及其图像是目前面临的主要技术难题^[6-8]。

刃边法是目前遥感相机在轨 MTF 检测的有效方法,已成功用于 SPOT (Système Probatoire d'Observation de la Terre) 卫星、Orbview 卫星、伊科诺斯卫星 (IKONOS) 等在轨 MTF 测量。国际标准化组织 (ISO) 也已有基于刃边法 MTF 评估算法 (ISO12233) 的标准测试方法^[9]。目前,关于使用非直线的刃边图像进行 MTF 测试的研究较少,且缺乏对关键步骤和精度的分析介绍。1999 年 Shea^[10] 使用月亮边缘对 GOES 卫星相机进行在轨测试;之后 Wang 等^[5,11] 对该方法进行了深入研究,并对其 EOS (Earth Observation Satellite) 和 NPP (National Polar-orbiting Partnership) 卫星系统中的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 和可见光红外成像辐射仪 (VIIRS) 进行 MTF 在轨检测,但没有涉及具体算法和精度分析。国内的在轨 MTF 检测研究主要包括基于月亮边缘的和基于弯曲刃边的在轨 MTF 检测,例如:陈博洋^[12] 对从月球图像中提取的刃边目标进行 MTF 计算,但未涉及具体的精度分析;朱近等^[13-14] 用多项式拟合弯曲刃边计算了 MTF。

对于空间相机而言,月亮边缘与深空背景形成高对比度的线状边缘图像性质符合常用对地观测遥感相机 MTF 检测方法中刃边法的靶标特定性质,因此本文提出了一种针对空间相机的在轨 MTF 检测方法,即月球边缘刃边法,该方法将深空背景中的月亮边缘作为测试目标^[14-17],合理利用空间相机自

身的观测目标,无须另外设计和安装专门检测仪器,也无须铺设地面靶标,能方便地实现 MTF 的实时在轨检测,且不要求卫星平台具有较高的机动能力,避免刻意翻转卫星运行姿态所造成的不必要风险,节省了人力、物力、财力,是在轨检测空间相机成像质量的理想方法。

2 方法介绍

2.1 MTF 检测原理与直线刃边法

常用的在轨 MTF 检测方法是针对符合计算要求的自然或人工靶标,拍摄在轨图像,对该图像进行相应的计算,得到该光电成像系统关于空间频率变化的 MTF 曲线,此时奈奎斯特频率下的 MTF 即为图像的 MTF。对于一个给定的成像系统,当输入函数是一个点光源 $\delta(x, y)$ 时,由于衍射和像差的影响,输出函数不再是一个聚集的点而是一个分散的光斑,称之为点扩展函数 (PSF)。同时 PSF 也是该成像系统的脉冲响应。PSF 的二维傅里叶变换就是光学传递函数,其振幅就是 MTF。

直线刃边法的输入图像包含两块有明显对比度的相邻的均匀亮暗区域,且边界平直,像一个刀刃,数学上可近似用阶跃函数表示,经过光学系统后,像的亮度分布为边缘扩展函数 (ESF),对 ESF 进行微分和傅里叶变换等操作即可得到 MTF。其具体原理如下:输入函数是一个阶跃函数,即

$$\text{step}(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: x 为自变量。该输入函数可由遥感图像的刃边图像区域提供,其通过光学系统后的输出函数即 ESF(x),可表示为

$$\text{ESF}(x) = \int_{-\infty}^x \text{LSF}(x) dx, \quad (2)$$

其中

$$\text{LSF}(x) = \frac{d}{dx} \text{ESF}(x). \quad (3)$$

ESF(x) 可看成是线扩展函数 (LSF) 的积分,它们是微分和积分的关系。LSF 的一维傅里叶变换就是该方向的 MTF。这是刃边法计算 MTF 的理论基础。

2.2 月球边缘刃边法

所提月球边缘刃边法的检测原理是直线刃边法在空间相机 MTF 检测的拓展与改进,输入图像是月球边缘与深空背景形成的圆形刃边区域,同样对其像的亮度分布进行边缘位置配准后得到 ESF,进而得到 MTF^[18]。该方法的步骤和流程图如图 1 和图 2 所示。

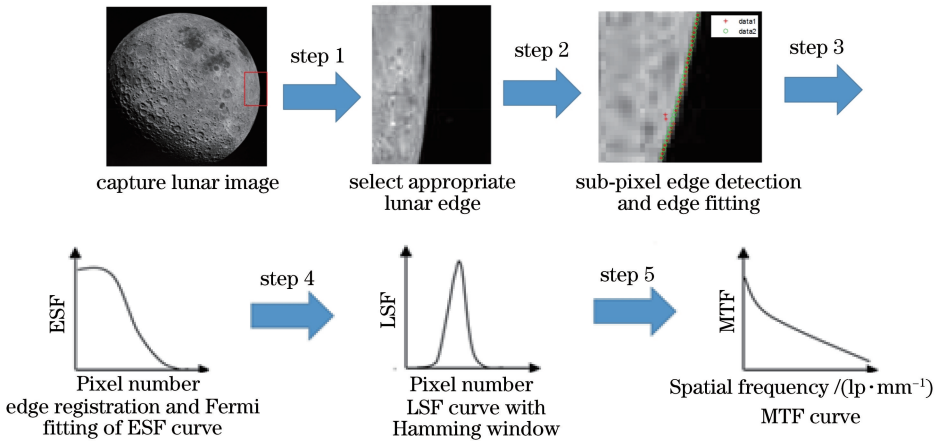


图 1 月球边缘刃边法的算法步骤

Fig. 1 Algorithmic process of lunar-edge method

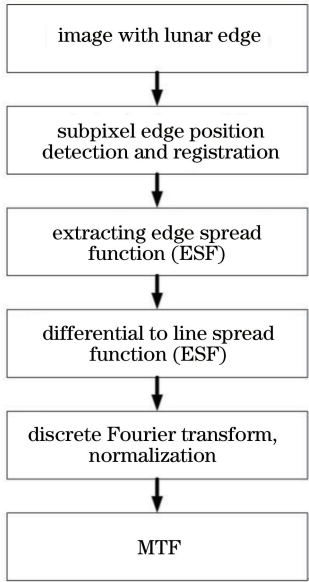


图 2 月球刃边法的流程图

Fig. 2 Flow chart of lunar-edge method

1) 月球边缘刃边区域选取。利用空间相机拍摄得到深空背景下的月球遥感图片,选择该图片中的某一段圆弧形月球边缘区域(通常选择月球的最左边、最右边、最上边或最下边区域圆弧,以得到该方向的 MTF)。

2) 亚像素边缘检测和拟合。对图像的每行数据点进行亚像素边缘检测,为了去除边缘检测的误差点,对得到的边缘位置进行圆形或曲线拟合,得到更为合理的亚像素边缘位置^[19]。

3) 边缘配准。光学成像系统中的电荷耦合器件(CCD)探测器可将光信号转换为电信号,伴随出现放大倍率随着像元大小变化而变化的降采样现象,导致边缘图像数据是一个离散的点序列而非连续曲线,使得 ESF 曲线部分信息缺失,直接影响最后得到的

MTF 结果。为了改善该问题,采用多行边缘配准的方法得到一条加密采样的 ESF 曲线。对于直线刃边而言,需要将刃边图像倾斜一个小角度以形成边缘错位,以某一行的边缘位置为基准,将其余行的边缘位置平移到该位置,形成一个多行加密采样的 ESF 曲线。而月球边缘刃边图像的优势在于其本身带有边缘位置错位,无须调整靶标方向或探测器成像方向。边缘配准方法如图 3 所示^[20-22]。

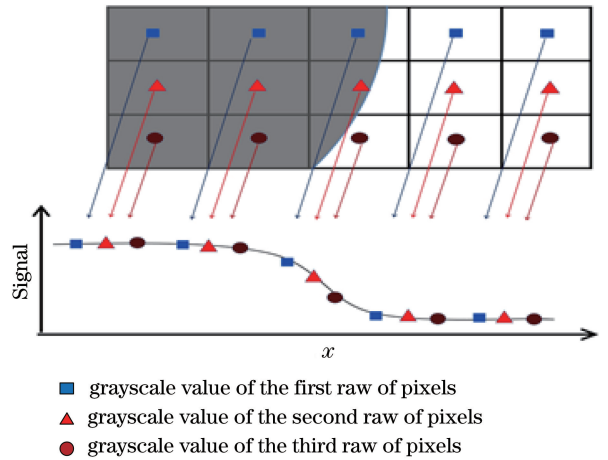


图 3 ESF 加密配准示意图

Fig. 3 Encryption matching schematic of ESF

4) ESF 和 LSF 曲线处理。对 ESF 曲线进行差分处理,得到 LSF 曲线,但是边缘配准得到的采样加密 ESF 曲线的采样点分布不均匀,且误差点对 LSF 曲线影响较大,因此需要对 ESF 和 LSF 曲线进行处理以得到更准确合理的结果。选择使用非参数化方法处理 ESF 曲线,使用参数化方法处理 LSF 曲线。

5) MTF 结果获取。将 LSF 曲线直接进行傅里叶变换,得到 MTF 曲线,一般选取奈奎斯特频率处的 MTF 值作为评价空间相机成像质量的指标^[23]。

3 仿真分析

3.1 仿真图像生成

待成像的物体进入光学成像系统后,依次经过镜头、探测器、电子电路三个环节后被衰减,衰减后的图像可表示为

$$MTF_{sys}(f) = MTF_{opt}(f) \cdot MTF_{det}(f) \cdot MTF_{elec}(f), \quad (4)$$

式中: f 表示空间频率; $MTF_{sys}(f)$ 、 $MTF_{opt}(f)$ 、 $MTF_{det}(f)$ 、 $MTF_{elec}(f)$ 分别表示系统、镜头、探测器和电子电路的MTF。镜头的衰减效应由衍射和像差构成,其PSF可近似由一个高斯模糊函数表示。互补金属氧化物半导体(CMOS)探测器的降采样包括光信号的采集、扩散和转移,其中信号采集对降采样结果的影响最大,其PSF可近似用矩形函数表示。电子电路通常包括模拟电子放大器和滤波器,实际成像电路通频带较宽,因此该部分引起的MTF

下降相对稳定,不影响MTF值相对下降的分析。

在仿真中,将理想图像卷积已知高斯函数以模拟光学镜头的PSF,再卷积矩形函数以模拟CMOS探测器的PSF,生成仿真图像,用于验证所提算法的正确性和精度。首先生成一幅 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 的边缘灰度图像,其中含有一段半径为1080 pixel的圆弧边缘,两边对比度为20:240。使用 127×127 、方差为4.5的高斯函数对图像进行模糊处理,并对图像进行8倍降采样,得到大小为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 、圆半径为135 pixel的低分辨率模糊图像,添加高斯随机噪声,得到信噪比(SNR)分别为30 dB,40 dB,50 dB的低分辨率模糊图像,并将其作为仿真图像。CMOS探测器的像元尺寸为0.012 mm,奈奎斯特频率(41.7 lp/mm)处的MTF值为0.145,符合一般航天器空间相机的MTF指标。该仿真图像和理论MTF曲线如图4所示,表1是各个空间频率处的理论MTF值。

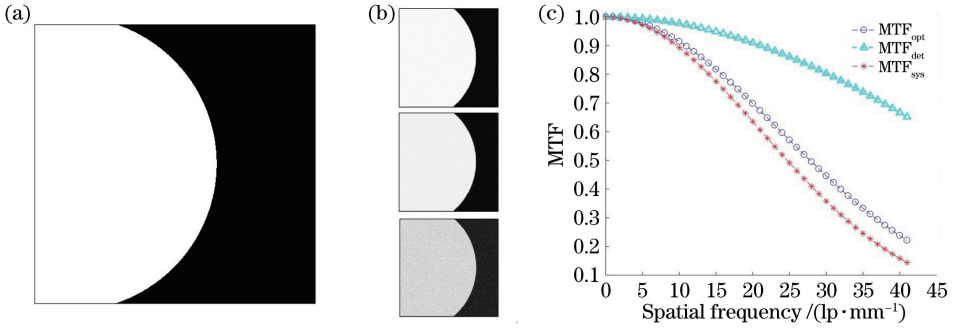


图4 生成的圆形刃边仿真图像。(a)高分辨率仿真图像;(b)低分辨率仿真图像;(c)仿真图像理论MTF曲线

Fig. 4 Generated round-edge simulation images. (a) High-resolution simulation image; (b) low-resolution simulation image; (c) theoretical MTF curve of simulation image

表1 在各空间频率处的理论MTF数值

Table 1 Theoretical MTF values at various spatial frequencies

Spatial frequency	MTF	Spatial frequency	MTF	Spatial frequency	MTF
0	1.000000	14	0.800863	28	0.409192
1	0.998751	15	0.774989	29	0.383224
2	0.995458	16	0.748124	30	0.358026
3	0.989765	17	0.720620	31	0.333701
4	0.982020	18	0.692468	32	0.310255
5	0.972031	19	0.663928	33	0.287773
6	0.960040	20	0.635065	34	0.266251
7	0.946013	21	0.606066	35	0.245743
8	0.930090	22	0.577041	36	0.226245
9	0.912383	23	0.548127	37	0.207774
10	0.892939	24	0.519447	38	0.190336
11	0.871990	25	0.491109	39	0.173907
12	0.849512	26	0.463225	40	0.158507
13	0.825830	27	0.435892	41	0.144072

3.2 亚像素边缘检测

目前亚像素边缘检测方法大致分为三种,分别为基于矩、基于插值和基于边缘模型函数拟合的方法。在这三种检测类型中各选取一种方法实现刃边法的亚像素边缘检测,即灰度矩法、三次样条插值法、双曲正切函数拟合法。由于这里是对每行数据点进行亚像素边缘检测,故下述方法均为一维边缘检测。对其精度和影响因素在 Matlab 平台上进行仿真对比分析,找出刃边法适用的最佳亚像素边缘检测方法。

选取月亮边缘刃边仿真图像中长为 81 pixel、宽为 30 pixel 的边缘图像,其仿真图像与理论边缘

位置如图 5 和表 2 所示。使用所提三种边缘检测方法得到的亚像素边缘位置与理论边缘位置的方均根误差作为检测精度的评价指标,如表 3 所示。



图 5 边缘区域图像

Fig. 5 Edge-area image

表 2 仿真图像对应行数的理论边缘位置

Table 2 Theoretical edge position of each line in simulation image

Row No.	Edge position	Row No.	Edge position	Row No.	Edge position
1	33.7188	11	35.4844	21	36.5000
2	33.9375	12	35.6094	22	36.5156
3	34.1406	13	35.7500	23	36.6250
4	34.3281	14	35.8750	24	36.6250
5	34.5313	15	35.9844	25	36.6406
6	34.7031	16	36.0781	26	36.7500
7	34.8750	17	36.1719	27	36.7500
8	35.0469	18	36.2500	28	36.7500
9	35.1875	19	36.3594	29	36.7500
10	35.3438	20	36.4063	30	36.7500

表 3 三种方法的边缘检测误差

Table 3 Edge detection error of three methods

SNR /dB	Edge detection error /pixel		
	Interpolation method	Gray moment method	Fitting method
50	0.2205	0.0156	0.0133
40	0.2570	0.0222	0.0215
30	0.5167	0.0871	0.0422

上述结果表明:对于不同信噪比图像,三次样条插值法检测精度较低,误差大于 0.2 pixel,这是因为基于插值的方法是根据像素点的灰度值关系增加合理信息实现的,计算简单,但是该方法过于依赖原始数据,易受噪声的影响;灰度矩法检测精度较高,但受噪声影响较大,当信噪比为 30 dB 时,误差达到 0.08 pixel,这是因为基于矩的方法根据理想边缘图像的不变矩特性求取边缘参数,计算简便,但该边缘模型是理想无衰减的,对噪声不稳定;基于双曲正切函数拟合法的精度较高,对噪声有较好的稳健性,对于信噪比为 30 dB 以上图像边缘的检测误差小于 0.05,这是因为如果基于边缘模型函数拟合的方法构建了准确的边缘函数模型,则其检测精度高于其余两种方法,并对噪声具

有良好的稳健性,但是该方法较为依赖构建的函数模型,需要选择准确合适的边缘函数模型。仿真结果表明双曲正切函数模型较为适用于所提的边缘图像灰度分布。因此选择使用双曲正切函数拟合法进行亚像素边缘检测。

3.3 边缘拟合

所研究对象是月亮的边缘,假设月亮边缘的真实形状是圆弧,则检测和拟合区域是一段圆弧,上一步边缘检测得到的数据点也应该是一段圆弧,但由于噪声等因素的影响,边缘检测得到的数据点有些可能会偏离圆弧,对后续的 ESF 获取带来误差,从而影响 MTF 的计算结果,因此需要进行边缘拟合以减小误差。最小二乘拟合法通过最小化实际数据与估算函数得到的对应数据点的误差平方和,得到函数的最佳参数估计,该方法简便实用,拟合效果好。当函数形式已知时可以快速估计出误差最小的参数。这里采用直线、二次多项式、圆拟合这三种方法拟合月亮边缘,并分析这三种方法在不同圆弧长度、不同噪声情况下的拟合精度。

对于信噪比为 50 dB, 40 dB, 30 dB 的仿真图像,分别选取圆心上方 4°, 8°, 12°, 20°, 40°, 60° 圆

弧,使用双曲函数拟合亚像素边缘检测得到边缘位置坐标点,拟合得到的结果如表 4 所示,同样用

其与理论边缘位置的方均根误差作为精度的评价指标。

表 4 不同长度圆弧的边缘拟合误差

Table 4 Edge fitting error of arcs with different lengths

SNR /dB	Arc degree /($^{\circ}$)	Fitting error /pixel		
		Straight line fitting	Polynomial fitting	Circle fitting
50	4(6 rows)	0.0052	0.0068	0.0084
	8(12 rows)	0.0575	0.0254	0.0255
	12(18 rows)	0.0970	0.0290	0.0288
	16(24 rows)	0.1653	0.0259	0.0257
	20(30 rows)	0.2523	0.0235	0.0234
	40(60 rows)	1.0042	0.0171	0.0169
40	60(90 rows)	2.2933	0.0220	0.0144
	4(6 rows)	0.0098	0.0100	0.1247
	8(12 rows)	0.0581	0.0273	0.0267
	12(18 rows)	0.0976	0.0308	0.0306
	16(24 rows)	0.1653	0.0269	0.0262
	20(30 rows)	0.2524	0.0239	0.0238
30	40(60 rows)	1.0042	0.0181	0.0181
	60(90 rows)	2.2933	0.0235	0.0166
	4(6 rows)	0.0788	0.0803	0.2666
	8(12 rows)	0.0936	0.0784	0.0796
	12(18 rows)	0.1024	0.0467	0.0722
	16(24 rows)	0.1666	0.0347	0.0381
	20(30 rows)	0.2532	0.0351	0.0442
	40(60 rows)	1.0050	0.0432	0.0424
	60(90 rows)	2.2936	0.0499	0.0461

上述结果表明:直线拟合对于短圆弧的拟合精度高、速度快,对信噪比大于 30 dB 且小于 12° 圆弧的拟合误差小于 0.1,但对大于 12° 的圆弧的拟合误差较大,大于 0.1;圆拟合对于信噪比较低且小于 8° 的圆弧的检测精度较低,当信噪比小于 40 dB 时,对 4° 圆弧的拟合误差大于 0.1;多项式拟合在不同长度圆弧和不同信噪比情况下的精度均较高,小于 0.1,因此选择使用多项式拟合边缘。当信噪比从 50 dB 降到 30 dB 时,三种边缘拟合方法检测误差也逐渐增大,其中对 12° 圆弧的多项式拟合的误差从 0.029 增大到 0.0467。

3.4 ESF 与 LSF 的处理

ESF 曲线提取是保证刃边法计算精度的关键步骤之一。采用多行配准的方法可以得到采样点加密的 ESF 曲线,但它并不是平滑连续的,也不能精确表征实际图像的 ESF 分布。为了充分利用图像数据,同时降低随机噪声的影响,需要再对 ESF 进行处理。目前常用的方法分为参数化方法(Fermi 函数拟合法)和非参数化方法[三次样条插值平滑、

Savitsky-Golay(SG)滤波平滑法]。参数化方法可以得到形状规则且平滑的 ESF 曲线,且能有效抑制噪声,后续不需要对直接差分得到的 LSF 曲线进行处理,但对选择模型有较高要求,否则会有较大误差;非参数化方法的结果不改变原始数据曲线的形状,更贴近原始数据点,误差较小,但抑制噪声效果不够好,后续直接差分得到的 LSF 曲线会放大噪声,需要对 LSF 曲线进行处理。分别使用参数化和非参数化方法进行对比分析,得到精度更高的处理方法。

对于参数化方法,刘亮等^[24]和李铁成^[25]研究了 Fermi、Cauchy、Gumbel、Gauss 等函数模型对 ESF 曲线的拟合,对比结果显示:使用 Fermi 函数对加密采样的 ESF 曲线进行拟合的精度最高。由于大多数刃边的两边灰度分布并不是关于中心点严格对称,选用一次 Fermi 函数不能准确拟合,需选取三次 Fermi 函数进行拟合,其表达式为

$$F(x) = \sum_{i=1}^3 \frac{a_i}{1 + \exp[(x - b_i)/c_i]} + d, \quad (5)$$

式中: i 为阶次; a_i 为边缘两侧灰度差值; b_i 为中心位

置相对 x 轴原点的偏移; c_i 为斜度; d 为中心位置相对 y 轴原点的坐标。对多行边缘位置及两侧像元值重排配准后, 形成一条加密的 ESF 曲线数据点, 通过模拟退火算法求解参数, 得到 Fermi 函数表达式, 按照 0.1 pixel 的采样间隔得到新的数据点, 形成拟合后的 ESF 曲线。

对于非参数化方法, SG 滤波器将数据划分为无数个局部小区域, 对每个局部区域进行多项式最小二乘拟合, 可以在滤除噪声、平滑数据的同时保证数据曲线的形状不变, 被广泛用于信号的平滑去噪。Choi 等^[5]提出的改进方法是用一定长度的窗口代替固定长度数据段进行滤波, 可用于数据点分布不均匀的 ESF 曲线, 在平滑噪声的同时进行插值运算, 该改进方法也称为修正的 SG 方法(以下简称为 MSG), 最后得到一条平滑、间隔为 0.1 pixel 的 ESF 曲线。但是该方法抑制噪声的能力较小, 差分得到的 LSF 曲线会有较多毛刺, 从而产生误差, 因此需要进行函数拟合。基于 Schowengerdt 等^[26]对系统模型的分析表明, 一个待测的光学系统 PSF 的通用模型可表示为二维高斯函数, 这个高斯函数是可分离的。而 LSF 是 PSF 在其中一个方向上的采样, 其曲线可近似用一维高斯函数拟合, 因此一般使用高斯函数拟合 LSF 曲线。然而一个高斯函数只能适用于拟合标准的 LSF 曲线, 在拟合过程中容易出现欠拟合和过拟合现象, 且不适用于非标准的 LSF 曲线, 易出现较大误差。因此在高斯函数拟合的基础上, 使用双高斯函数模型来描述 LSF 曲线, 并取得了较好效果, 如图 6 所示。

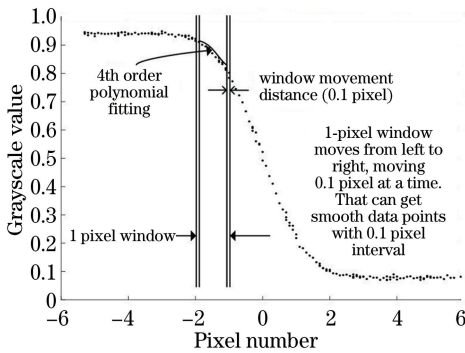


图 6 双高斯曲线拟合方法

Fig. 6 Double Gaussian curve fitting method

对于信噪比为 30 dB, 40 dB, 50 dB 的仿真图像, 使用双曲函数拟合亚像素边缘检测, 使用二次多项式拟合得到边缘位置坐标点, 后续分别采用 Fermi 函数拟合 ESF 曲线、MSG 滤波处理 ESF 曲线加 LSF 单高斯拟合、MSG 滤波处理 ESF 曲线加

LSF 双高斯拟合, 来比较多种处理方法的精度。这里使用最后得到的 MTF 曲线与理论 MTF 曲线在 0 到奈奎斯特频率处值的方均根误差作为精度的评价指标, 如表 5 所示。

表 5 不同方法的精度结果

Table 5 Accuracy results of different methods

SNR /dB	Fermi	MSG+single	MSG+double
		Gaussian fitting	Gaussian fitting
50.0	0.0106	0.0273	0.0084
47.5	0.0107	0.0290	0.0090
45.0	0.0108	0.0308	0.0095
42.5	0.0112	0.0373	0.0103
40.0	0.0112	0.0393	0.0107
37.5	0.0131	0.0404	0.0129
35.0	0.0133	0.0573	0.0136
32.5	0.0144	0.0665	0.0140
30.0	0.0139	0.1049	0.0142

上述结果表明: MSG 组合单高斯拟合法误差较大且受噪声影响较大, 当信噪比为 30 dB 时, 误差达到 0.1049; Fermi 函数法检测误差较 MSG 组合单高斯拟合法误差稍小, 且对噪声不敏感, 随着信噪比的降低误差稳定在 0.014 左右; MSG 组合双高斯拟合法在高信噪比情况下检测精度较高, 当信噪比高于 45 dB 时, 测试误差为 ± 0.01 , 当图像信噪比高于 30 dB 时, 测试误差为 ± 0.015 , 当信噪比减小到 35 dB 后, 其误差逐渐大于 Fermi 函数法。由于航天器采集图像的信噪比一般较高, 选择使用 MSG 组合双高斯拟合法精度较高, 但当出现图像信噪比远低于 30 dB 的情况时, 可考虑使用 Fermi 函数法以减小噪声带来的误差。

4 实验测试

利用仿真阶段得到的优化月球边缘刃边法对某相机成像系统进行焦面位置标定测试实验, 相机系统分别对定制的三线靶标和三个不同半径大小的圆形刃边靶标在其焦面前后 0.7 mm 深度范围内每隔 0.05 mm 采集一次图像, 针对每个靶标得到 30 幅过焦位置图像。计算月亮边缘刃边法得到的过焦 MTF 数据点, 拟合得到 MTF 过焦曲线, 以三线靶标图像计算得到的 MTF 过焦曲线为参考, 分析和验证所提测试方法得到的焦面位置以及 MTF 值的精度和稳定性。

4.1 实验装置与步骤

MTF 测试实验系统主要包括光源、靶标、平行光管、光学镜头、CCD 探测器和图像采集装置。分别放入三线靶标和圆形刃边靶标, 转动调焦电机,

使得 CCD 探测器在焦面位置前 0.7 mm 深度左右, 往后以固定步长移动调焦电机, 同时每隔 0.05 mm 采集一次靶标图像, 直到 CCD 探测器移动到焦面位置后 0.7 mm 深度左右, 即每组共采集 30 幅靶标图像, 得到待测相机成像系统焦面位置

前后 0.7 mm 深度的三线靶标和圆形刃边靶标数字灰度图像组。使用所提算法对靶标图像进行计算, 得到待测光学系统的 MTF 测量值。实验室搭建的测试系统示意图和各个实验器件的参数分别如图 7 和表 6 所示。

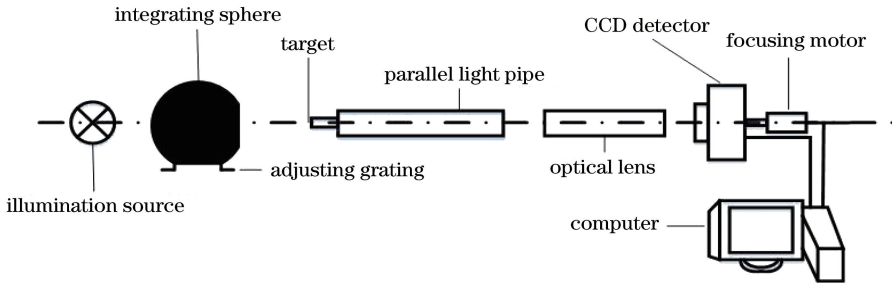


图 7 测试系统示意图

Fig. 7 Schematic of test system

表 6 实验器件参数

Table 6 Parameters of experimental devices

Experimental device	Parameter
Light source	Center wavelength: 650 nm
Parallel light pipe	Focallength: 1000 mm
Lens	Relative aperture: 1:12
CCD detector	Cell size: 0.012 mm

本次实验测试 MTF 的两种靶标, 结果如图 8 所示。1) 三线靶标: 在水平方向有 5 组亮暗条纹构成的三线靶标, 每组靶标有 11 条亮暗条纹, 每个条纹宽度为 1 个像元, 可以通过计算图像中亮暗条纹的对比度得到奈奎斯特频率处的 MTF 值, 即

$$MTF_{Nyquist} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{D_{barh} - D_{barl}}{D_{barh} + D_{barl}},$$

其中 D_{barh} 是亮条纹的灰度值, D_{barl} 是暗条纹的灰度值。

2) 圆形刃边靶标: 本次测试用三个不同半径大小的圆形刃边靶标来模拟月球边缘, 半径分别为 40, 30, 20 mm, 得到的图像半径大小分别为 333, 250, 167 行。

4.2 实验结果与分析

4.2.1 三线靶标实验结果

分别计算采集到的 30 幅过焦三线靶标图像在奈奎斯特频率处的 MTF 值(表 7), 得到 MTF 过焦曲线如图 9 所示, 将该结果作为参考值, 验证月球边缘刃边法的测试精度。

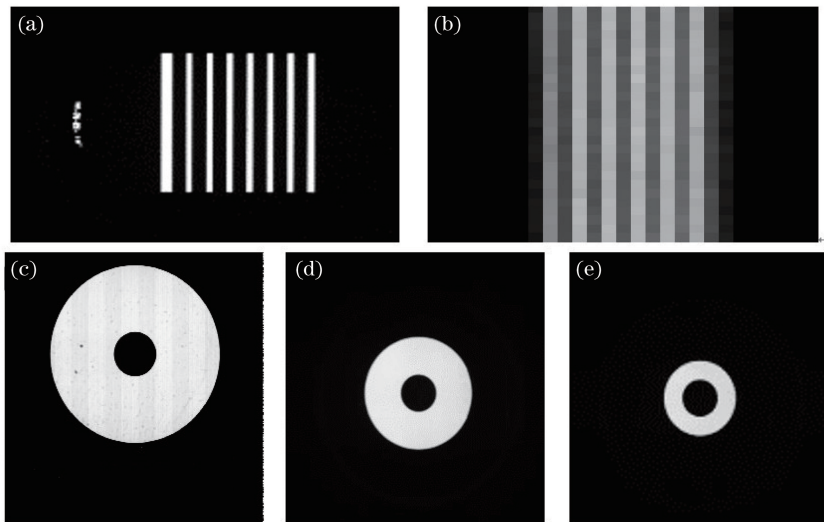


图 8 两种测试靶标采集图像。(a) 三线靶标; (b) 三线靶标(局部放大);

(c) 圆形边缘靶标 1; (d) 圆形边缘靶标 2; (e) 圆形靶标 3

Fig. 8 Acquisition images of two test targets. (a) Three-bar target; (b) three-bar target (local amplification); (c) round-edge target 1; (d) round-edge target 2; (e) round-edge target 3

表 7 三线靶标测试的 MTF 值

Table 7 MTF values of three-bar target test

Defocus position /mm	MTF	Defocus position /mm	MTF	Defocus position /mm	MTF
-0.75	0.00920	-0.25	0.16764	0.25	0.19157
-0.70	0.01141	-0.20	0.18051	0.30	0.14862
-0.65	0.02217	-0.15	0.19376	0.35	0.13900
-0.60	0.03439	-0.10	0.22116	0.40	0.11761
-0.55	0.04168	-0.05	0.2333	0.45	0.09270
-0.50	0.05688	0.00	0.22568	0.50	0.05384
-0.45	0.08602	0.05	0.22186	0.55	0.04535
-0.40	0.10215	0.10	0.21710	0.60	0.01680
-0.35	0.12632	0.15	0.21792	0.65	0.00032
-0.30	0.13891	0.20	0.19957	0.70	0.00012

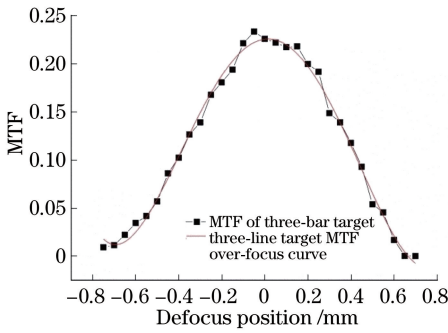


图 9 三线靶标测试的 MTF 过焦曲线

Fig. 9 MTF over-focus curve of three-bar target test

对数据点进行 4 次多项式拟合得到三线靶标 MTF 过焦曲线表达式为 $y = 0.22549 + 0.02673x - 0.85795x^2 - 0.08298x^3 + 0.82124x^4$, 如图 9 所示, 该相机系统的 MTF 过焦曲线是一个平滑的抛物线型曲线, 在 0.01 mm 位置处达到 MTF 最大值 0.2257, 在 -0.44 mm 到 0.46 mm 距离之间 MTF 值大于 0.08。

4.2.2 月球边缘刃边法实验结果

针对这三个圆形刃边靶标图像, 分别选取其边缘数据并使用所提算法流程进行 MTF 计算。得到的过程图(边缘检测亚像素位置、ESF、LSF)以及计算结果如图 10 所示。

圆形刃边靶标图像的 MTF 值和 MTF 过焦曲线分别如表 8 和图 11 所示。

圆形刃边靶标经过拟合得到的 MTF 过焦曲线表达式为 $y = 0.21733 - 0.03907x - 0.70375x^2 + 0.00768x^3 + 0.6602x^4$, 在 0.025 mm 位置处达到 MTF 最大值 0.2178, 在 -0.55 mm 到 0.45 mm 距离之间 MTF 值大于 0.08, 其与三线靶标过焦曲线之间的方均根误差为 0.024, 焦面位置误差为 0.015, 该曲线与三线靶标法得到的过焦曲线基本吻合。实验结果证明, 利用所提月球边缘刃边法计算 MTF 是可行的。

表 8 圆形刃边靶标测试的 MTF 值

Table 8 MTF values of round-edge target test

Defocus position /mm	Round-edge target 1	Round-edge target 2	Round-edge target 3
-0.75	0.00109	0.05828	0.06555
-0.70	0.03612	0.06823	0.07635
-0.65	0.06608	0.08410	0.08156
-0.60	0.03407	0.08210	0.09555
-0.55	0.07076	0.08805	0.09635
-0.50	0.08372	0.11530	0.13225
-0.45	0.08201	0.14231	0.12667
-0.40	0.10369	0.15450	0.15703
-0.35	0.11279	0.15477	0.16997
-0.30	0.14080	0.17789	0.19099
-0.25	0.16225	0.17268	0.19216
-0.20	0.18424	0.18441	0.21711
-0.15	0.19507	0.20169	0.22634
-0.10	0.19621	0.20218	0.23121
-0.05	0.21491	0.19751	0.21939
0.00	0.22924	0.20478	0.23830
0.05	0.22083	0.20034	0.21507
0.10	0.22078	0.21254	0.20748
0.15	0.21589	0.18054	0.19756
0.20	0.20750	0.18907	0.18829
0.25	0.18407	0.17510	0.17659
0.30	0.14150	0.14235	0.15959
0.35	0.13955	0.12649	0.10052
0.40	0.10618	0.10087	0.08592
0.45	0.09021	0.06674	0.08080
0.50	0.07664	0.06061	0.06878
0.55	0.06089	0.02211	0.00700
0.60	0.05772	0.00595	0.03814
0.65	0.00038	0.00249	0.03138
0.70	0.00081	0.00034	0.03958

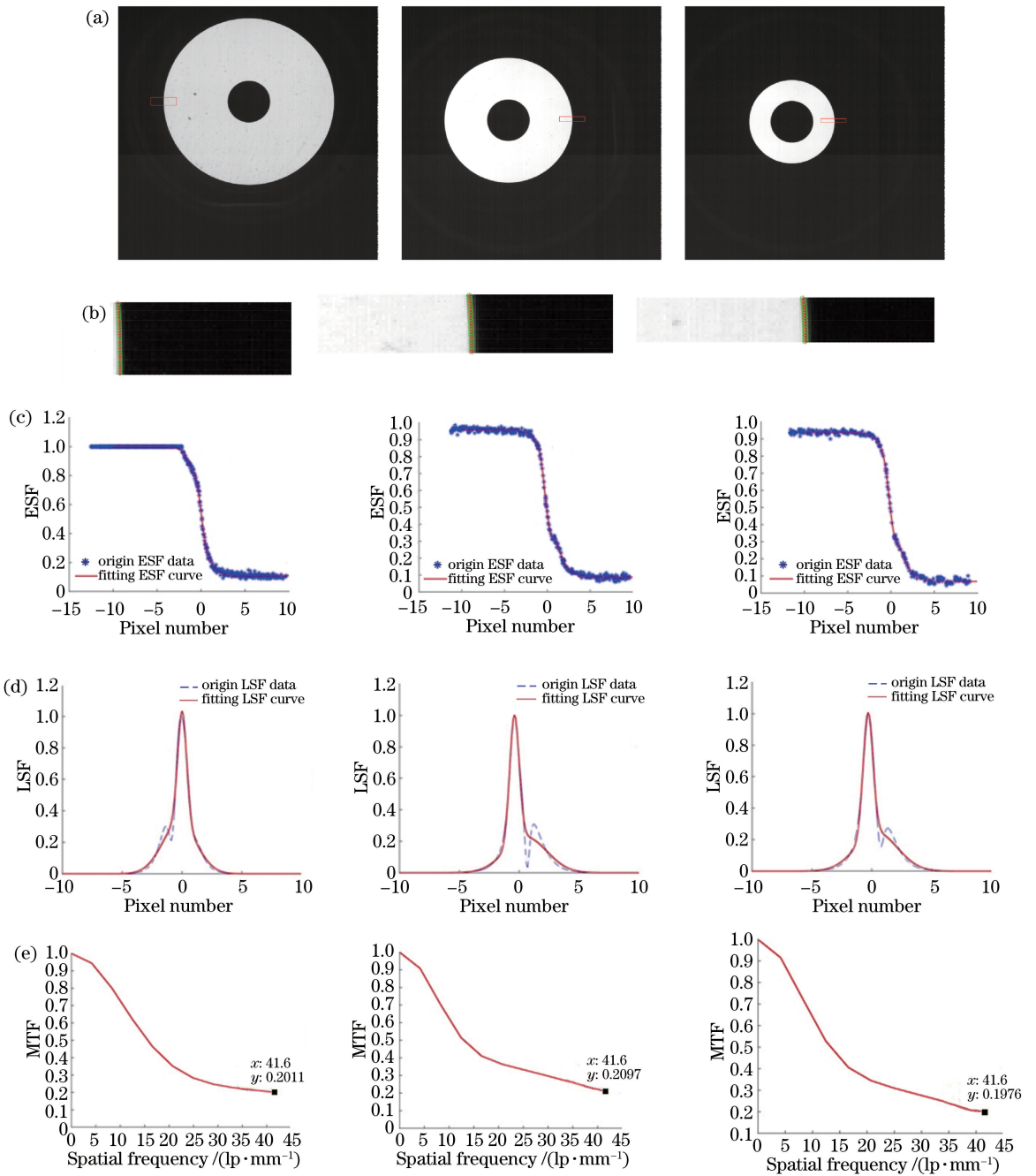


图 10 实验图像月球边缘刃边法计算结果。(a)三个不同半径的圆形靶标图像;

(b)亚像素边缘检测位置;(c)ESF曲线;(d)LSF曲线;(e)MTF曲线

Fig. 10 Results of lunar-edge method from laboratory images. (a) Images of three round-edge targets with different radii;

(b) positions of subpixel-edge detection; (c) ESF curves; (d) LSF curves; (e) MTF curves

5 结 论

在系统调研国内外遥感相机在轨 MTF 测试方法的基础上,针对空间探测相机的成像模式和工作环境提出了月球边缘刃边法在轨 MTF 测试方法,并通过仿真分析对各环节处理方法进行分析比较,得到优化的算法流程。在 ESF 处理步骤

中,使用 MSG 组合双高斯拟合法得到的 MTF 曲线的误差更小,仿真结果表明,当图像信噪比高于 45 dB 时,测试误差为 ± 0.01 ,当图像信噪比高于 30 dB 时,测试误差为 ± 0.015 。最后,实验验证了月球边缘刃边法的有效性与测试精度,结果表明所提方法能够实现对相机焦面位置和 MTF 的准确标定。

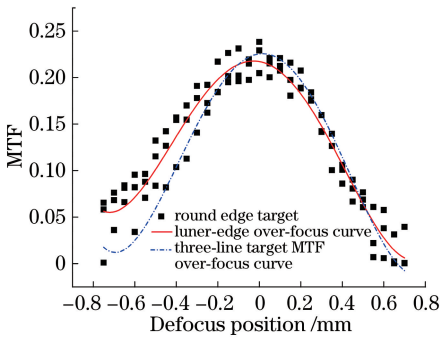


图 11 月球边缘刃边法 MTF 过焦曲线

Fig. 11 MTF over-focus curves of lunar-edge method

参 考 文 献

[1] Nelson N R, Barry P S. Measurement of Hyperion MTF from on-orbit scenes[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4480: 236-241.

[2] Deng C C, An Y, Mu D Q, *et al.* Effect of flywheel micro-vibration on modulation transfer function of space camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(1): 0111001.
邓长城, 安源, 母德强, 等. 飞轮微振动对空间相机调制传递函数的影响[J]. 光子学报, 2016, 45(1): 0111001.

[3] Guo Y, Liu X P. Modulation transfer function (MTF) analysis for CCD[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing Papers, 2004, 25(3): 25-28.

[4] Xiang C C. MTF measurement of CCD digital camera [D]. Suzhou: Soochow University, 2011.
相春昌. CCD 相机调制传递函数的测量[D]. 苏州: 苏州大学, 2011.

[5] Choi T, Xiong X X, Wang Z P. On-orbit lunar modulation transfer function measurements for the moderate resolution imaging spectroradiometer [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1): 270-277.

[6] Leger D, Viallefont F, Hillairet E, *et al.* In-flight refocusing and MTF assessment of SPOT5 HRG and HRS[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4881: 224-231.

[7] Storey J C. Landsat 7 on-orbit modulation transfer function estimation[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4540: 50-61.

[8] Viallefont-Robinet F, Léger D. Improvement of the edge method for on-orbit MTF measurement [J]. Optics Express, 2010, 18(4): 3531-3545.

[9] International Organization for Standardization. Photography. Electronic still picture imaging. Resolution and spatial frequency responses[S]. UK: The British Standards Institution, 2014-02-28.

[10] Shea J J. Lunar limb knife-edge optical transfer function measurements [J]. Journal of Electronic Imaging, 1999, 8(2): 196-208.

[11] Wang Z P, Xiong X X, Choi T, *et al.* On-orbit characterization of MODIS modulation transfer function using the moon [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(7): 4112-4121.

[12] Chen B Y. Evaluation of MTF for FY-2G middle infrared band based on moon observation and image restoration [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 430-437.
陈博洋. 基于月球观测的 FY-2G 中波红外波段在轨调制传递函数评价与图像复原[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 430-437.

[13] Zhu J, Pan Y, Xu T, *et al.* The algorithm for computing MTF of remote sensing image in mid-low spatial resolution and with curve edge [J]. Remote Sensing Information, 2009, 24(3): 3-6.
朱近, 潘瑜, 徐涛, 等. 基于弯曲刃边的中低分辨率遥感影像 MTF 计算方法 [J]. 遥感信息, 2009, 24(3): 3-6.

[14] Huang L. Research on MTF on-orbit detection method for medium and low resolution satellite imaging system [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
黄黎. 中低分辨率卫星成像系统的 MTF 在轨检测方法研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2009.

[15] Li X B, Zhou C P, Chi Y F. Simulation of in-orbit satellite image MTF measurement using edge method [J]. Image Technology, 2007, 19(6): 33-39.
李晓斌, 周春平, 迟云峰. 刃边法计算在轨卫星图像 MTF 的仿真分析 [J]. 影像技术, 2007, 19(6): 33-39.

[16] Léger D, Duffaut J, Robinet F. MTF measurement using spotlight [C] // Proceedings of IGARSS '94-1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, August 8-12, 1994, Pasadena, CA, USA. New York: IEEE, 1994: 2010-2012.

[17] Shea J J. Lunar limb knife-edge MTF measurements [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3221: 448-462.

[18] Meng W, Jin L X, Li G N, *et al.* Application of MTF in remote sensing image restoration [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(5): 1690-1696.
孟伟, 金龙旭, 李国宁, 等. 调制传递函数在遥感图像复原中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1690-1696.

[19] Li H, Yan C X, Shao J B, *et al.* High accuracy measurement of the MTF of electro-optical imaging system based on modified slanted-edge method [J].

- Acta Photonica Sinica, 2016, 45(12): 1211002.
- 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.
- [20] Zhang M J. Research on sub pixel edge detection technology [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2013.
- 张美静. 亚像素边缘检测技术研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2013.
- [21] Dai Q Y, Xia D S, He H Y, *et al.* Performance analysis of MTF measurement using edge method [J]. Spacecraft Recovery & 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.
- [22] Li H Q, Yu Q C. Application of Otsu thresholding method on Canny operator[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(9): 2297-2299.
- [23] Zhu J, Pan Y. MTF calculation method for low resolution remote sensing images based on curved edges [J]. Remote Sensing Information, 2009, 10(3): 3-6.
- [24] Liu L, Li X B, Jiang X G, *et al.* Accuracy of knife-edge method in MTF assessment [J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012, 29(6): 786-792.
- 刘亮, 李显彬, 姜小光, 等. 刃边法的 MTF 评价精度分析[J]. 中国科学院研究生院学报, 2012, 29(6): 786-792.
- [25] Li T C. Research on modulation transfer function calculation and remote sensing image restoration based on slanted-edge method [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- 李铁成. 基于倾斜刃边法的遥感图像调制传递函数计算及图像复原技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [26] White R G, Schowengerdt R A. Effect of point-spread functions on precision edge measurement [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1994, 11(10): 2593-2603.