

# 刃边法边缘扩散函数最优提取方法

陈起行<sup>1,2</sup> 何 斌<sup>1</sup> 王俊琦<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为确定边缘扩散函数(ESF)最优提取方法,对基于三次样条插值与SG滤波的四种提取方法进行分析比较,包括Spline、SplineSG、MSG及SASG方法。分别通过仿真图像实验与实际遥感图像实验,分析了图像仅存在加性噪声以及图像中同时存在加性噪声与白噪声时,四种方法的有效性。实验结果表明,Spline与SplineSG方法的效果几乎完全一致,仿真实验中,二者线扩散函数(LSF)和调制传递函数(MTF)计算精确度约为SASG方法的2~3倍,MSG方法的3~5倍;而在实际遥感图像实验中,SASG方法与二者效果接近,遥感图像复原图像质量提升效果约为MSG方法的1.5~2倍;当条带噪声较明显时,SASG方法效果最优。因此,在刃边法实施过程中,根据噪声情况,边缘扩散函数的提取可以在SASG或Spline方法中选择。

**关键词** 遥感;刃边法;边缘扩散函数;调制传递函数

**中图分类号** TG161 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.111003

## Optimal Extraction for Edge Spread Function in Knife-Edge Method

Chen Qihang<sup>1,2</sup> He Bin<sup>1</sup> Wang Junqi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to confirm the optimal extraction method for edge spread function (ESF) in knife-edge method, four extraction methods based on the cubic spline interpolation and SG filtering, including Spline, SplineSG, MSG and SASG method are presented. By the experiments using simulation images and remote sensing images, in which only additive noise exists or white noise exists as well at the same time, effects of the four methods are analysed and compared. Experimental results show that Spline and SplineSG method have almost the same results, and the calculating accuracy of line spread function (LSF) and modulation transfer function (MTF) is nearly 2 to 3 times better than SASG method and 3 to 5 times better than MSG method in simulation experiments. While SASG method has the same results compared with Spline and Spline SG method in the practical experiments using remote sensing images. The improving effect of the image quality image restoration is 1.5 to 2 times better than MSG method. When the stripe noise is obvious, SASG method works best. Thus, according to the noise situation, SASG method or Spline method can be chosen for ESF extraction in the implementation process of the knife-edge method.

**Key words** remote sensing; knife-edge method; edge spread function; modulation transfer function

**OCIS codes** 120.0280; 110.4100; 120.2650; 070.6110

## 1 引言

卫星相机成像系统在轨点扩展函数(PSF)及调制传递函数(MTF)对卫星相机动态性能的监测以及提升遥感图像复原图像质量具有重要意义,其测量方法一直是国内外研究的重要内容。根据输入信号的不同,

收稿日期: 2015-05-28; 收到修改稿日期: 2015-06-29; 网络出版日期: 2015-10-25

基金项目: 国家863计划(863-2-5-1-13B)

作者简介: 陈起行(1990—),女,硕士研究生,主要从事光学遥感相机在轨调制传递函数测量精度与准确度方面的研究。

E-mail: santeliza@163.com

导师简介: 何 斌(1961—),男,博士,研究员,主要从事光学遥感相机CCD成像驱动电路设计方面的研究。

E-mail: hbemail@163.com

PSF/MTF的测量可以分为点光源法、刃边法、脉冲法以及周期靶标法等。考虑测量精度与稳定性,以及方法实施的经济性等方面,高分辨率卫星相机在轨MTF的测量多数采用刃边法<sup>[1-3]</sup>。

刃边法的测量原理是根据地面的刃边靶标提供的垂轨或顺轨方向的阶跃输入信号,得到边缘扩散函数(ESF),根据ESF微分求出该方向的线扩散函数(LSF),进而求出MTF与二维PSF。刃边法主要步骤包括刃边图像的选取、亚像素级边缘位置探测与边缘校准、边缘扩散函数的提取、线扩散函数的提取及MTF的获取等<sup>[4-9]</sup>。其中,ESF曲线的提取是保证刃边法计算精度的关键之一。

ESF曲线的提取是根据校准后的刃边边缘位置对图像进行重排获得ESF廓线后进行噪声抑制的过程,根据是否使用数学拟合模型可分为参数方法与非参数方法。参数方法常用高斯函数、三次Fermi函数、误差函数等作为模型对ESF廓线整体进行拟合,但由于图像之间尺寸、刃边倾角、噪声分布等条件的不同,可能会出现拟合结果不收敛的情况<sup>[4]</sup>。非参数化方法则不需要拟合模型,对不同图像条件下的数据有更好的适应性<sup>[4,10]</sup>。由于参数方法的稳定性不如非参数方法,刃边法中多采用非参数方法进行ESF曲线的提取。

典型的非参数化方法一般指三次样条插值方法。此外,Choi等<sup>[11]</sup>提出结合窗口思想对SG滤波方法进行改进,使之在平滑噪声的同时进行插值运算的MSG方法。本文通过基于MSG方法提出了SASG方法。徐航等<sup>[10]</sup>还提出了在三次样条插值后使用SG滤波来进一步平滑ESF曲线的组合提取方法。这几种方法是在廓线局部拟合后进行窗口输出,而不是对廓线整体进行拟合,故也可视为非参数方法。通过实验对这四种方法的有效性进行比较分析,以确定ESF提取的最优方法。

## 2 MSG方法存在的问题

MSG方法在SG平滑方法的基础上得以提出。SG方法于1964年由Savitsky与Golay提出,是以多项式为目标函数,通过移动窗口利用最小二乘法进行最佳拟合的数据流平滑方法<sup>[12]</sup>。SG方法的特殊之处在于采用了卷积系数表来求拟合多项式系数,达到快速、简便的目的。文献[13]中对其原理进行了详细介绍。

设窗口内待平滑的数据点为  $y(i), i = -m, \dots, 0, 1, 2, \dots, m$ 。

$n$  次目标多项式为

$$f(i) = b_{n0} + b_{n1} \cdot i + b_{n2} \cdot i^2 + \dots + b_{nk} \cdot i^k + \dots + b_{nn} \cdot i^n = \sum_{k=0}^n b_{nk} \cdot i^k \quad (1)$$

SG方法根据所求系数权数  $n$ 、 $k$  选择卷积系数表<sup>[11]</sup>,根据窗口内数据个数  $2m+1$  确定卷积系数,从而可以方便快捷地计算出拟合多项式各系数。拟合完成后,以窗口中心点的拟合值代替了  $f(0)$  进行输出。之后,窗口移动,去掉窗口最左端的值,并在最右端进行补充,形成下一个窗口后,再开始下一次拟合。

缩上可知,SG滤波处理的是均匀分布的数据,同时对数据只进行平滑而不插值。因此,要同时完成增加数据点与平滑噪声的目的,需要在SG方法的基础上进行一定的修改,使之适应分布不均匀的数据,并且在平滑的同时完成插值,这就是MSG方法<sup>[11]</sup>。

MSG方法应用于边缘扩散函数,为适应其数据分布不均匀的特点,将MSG窗口移动距离  $\Delta$  (亚像素级别)。当MSG窗口移动时,窗口中心输出值分布间距也为  $\Delta$ ,从而完成插值。实际应用中,MSG在窗口中采用四次或五次多项式来作为目标函数<sup>[10-11]</sup>,将窗口中心处的拟合值作为输出,并按照一定的分辨率进行移动。

然而,实验中由MSG方法得到的ESF存在较为剧烈的抖动,同时提取出的ESF阶跃信号倾角偏小,导致后续计算得到的LSF过窄,MTF曲线值偏大,以图1为例,深色曲线代表理想LSF/MTF曲线,浅色曲线代表MSG方法下的LSF/MTF曲线,可见MSG方法存在较为明显的误差。

分析MSG原理,造成误差的主要原因是在窗口移动的过程中,窗口内数据点的数量以及目标线型发生了变化,而插值拟合过程中始终使用同一个目标多项式,从而导致拟合精度上的损失。基于该分析,提出SASG方法对MSG方法进行改进。

## 3 SASG方法与仿真实验

### 3.1 SASG方法

在仿真实验中,MSG方法没有达到预期效果。分析认为是由于每个窗口内用于拟合的目标多项式不能随窗口内数据的变化而变化造成的。SASG方法与MSG方法的不同在于SASG方法能够根据窗口内数据点

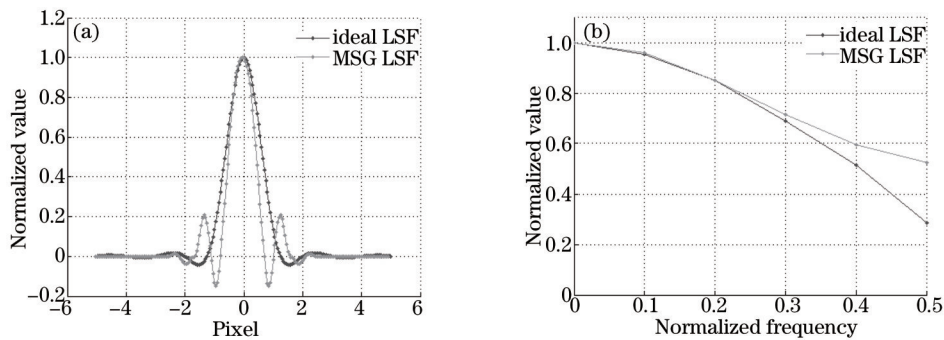


图1 MSG方法效果图

Fig.1 Effect picture of MSG method

的分布情况,改变目标多项式的次数,通过应用更准确的目标函数来获得更好的拟合效果,从而提高方法的准确性。SASG方法的自适应原理是根据求待拟合数据的最小二乘法下不同次数多项式拟合结果的残差绝对值之和的最小值来确定最优拟合多项式的次数。SASG方法中的目标多项式将在不同窗口的不同的数据分布条件下发生改变,体现由数据分布决定目标函数的思想。

SASG方法步骤如下:

- 1) 确定 SASG 窗口宽度(通常为 1 pixel)与窗口起止位置;
- 2) 分别对窗口内数据进行  $N$  次( $N=1, 2, 3, 4, 5$ )最小二乘拟合,计算并比较每种多项式拟合结果的残差绝对值之和,以残差和最小的拟合为该窗口内数据的拟合结果,并将窗口中心处的拟合值作为输出;
- 3) 根据所需数据点分布情况,将窗口移动一定距离(通常为 0.05 pixel)进行下一次拟合;
- 4) 重复步骤 2)~3),至所有数据拟合完成。

### 3.2 仿真实验

为验证 SASG 方法对 MSG 方法的改进效果并分析各方法的有效性,采用人工靶标的高斯卷积来模拟成像过程<sup>[1-2]</sup>。遥感图像成像过程可视为原图像与成像系统点扩展函数的卷积,

$$g(x,y) = [f(x,y) + n_{\text{back}}(x,y)] \cdot h(x,y) + n_{\text{sys}}(x,y), \quad (2)$$

式中  $f(x,y)$  与  $g(x,y)$  分别代表原图像与遥感图像,  $n_{\text{back}}(x,y)$  与  $n_{\text{sys}}(x,y)$  分别代表背景噪声与系统噪声,  $h(x,y)$  代表点扩展函数,常用高斯函数表示为

$$h(x,y) = \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right], \quad (3)$$

式中  $\sigma = 0.5$ ,也可取其他值。

通过高斯卷积模板得到成像系统的理想半峰全宽(FWHM)及 MTF 值,如表 1 所示。

表1 理想 FWHM 及 MTF 值

Table 1 Ideal FWHM and MTF value

Frequency	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	FWHM
MTF	1	0.9518	0.8498	0.6900	0.5130	0.2868	1.2891

实验以 800 pixel×1400 pixel,亮暗灰度值分别为 210、40,刃边倾角为 8°作为原图像,经过如(3)式所示高斯模糊以及添加不同类型噪声并截取不同尺寸仿真靶标,得到十组仿真实验。通过重复十组实验,不同组间可以对比在噪声、尺寸等不同条件下,四种 ESF 提取方法对 LSF/MTF 曲线提取的影响。为便于对比分析,设定三个参数来评价 LSF/MTF 曲线与理想 LSF/MTF 曲线的差异,分别是 LSF 曲线 FWHM、奈奎斯特频率处 MTF 值的相对误差  $\Delta\%$  以及 MTF 曲线相对理想 MTF 曲线的均方误差(MSE),如图 2 所示,其中 1、2 组无噪声;3、4 组添加高斯背景白噪声;5、6 组添加均匀背景白噪声;7、8 组添加高斯系统白噪声;9、10 组添加均匀系统白噪声;此外,单数组尺寸为 40 pixel×60 pixel,双数组尺寸为 60 pixel×40 pixel。

对比每组实验中 SASG 方法与 MSG 方法的结果,可见 SASG 方法的精度比 MSG 方法分别提升约一倍,说明 SASG 方法能够改善 MSG 方法的不足。其次,Spline 方法与 SplineSG 方法在图 2 中的参数曲线几乎完全重合,说明二者的结果几乎一致(将两者统称为样条方法)。综合图 2 来看,样条方法的 FWHM 曲线与理想

FWHM 曲线最接近,奈奎斯特频率处的 MTF 值的相对误差曲线与 MTF 曲线整体的均方误差曲线也最接近于 0,其精度大致较 SASG 方法与 MSG 方法分别提升约 24%和 37%。综合所有仿真实验结果,三次样条方法与样条组合法效果基本相同,对 ESF 曲线拟合效果最优,SASG 方法以及 MSG 方法效果依次次之。此外,为算法简便性考虑,Spline 方法优于 SplineSG 方法。

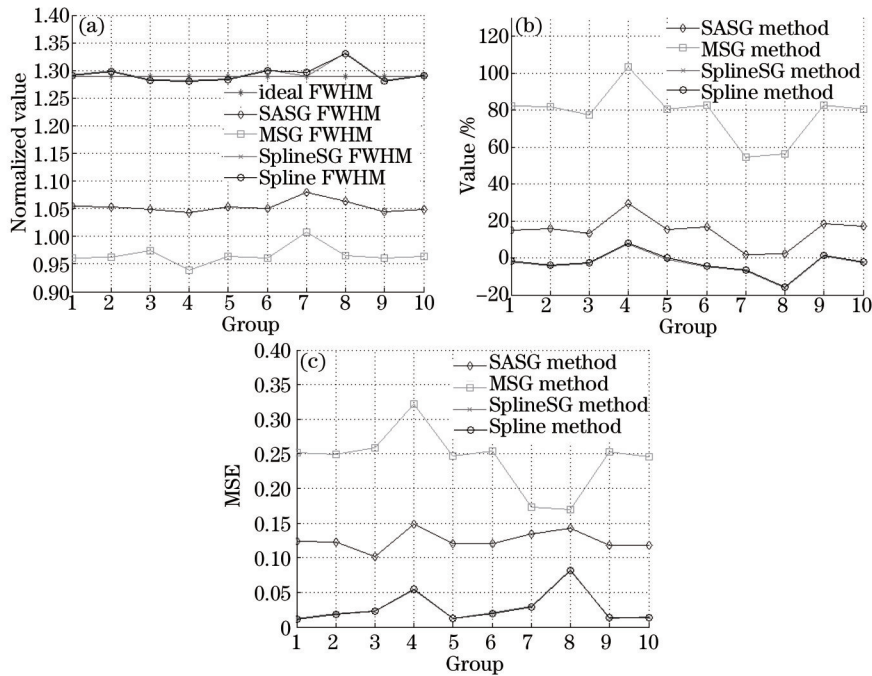


图 2 三个参数仿真实验结果。(a) FWHM; (b) 奈奎斯特频率处 MTF 值的相对误差; (c) 均方误差

Fig.2 Simulation experiments results of three parameters. (a) FWHM; (b) relative error of MTF @ Nyquist; (c) MSE

#### 4 实际遥感图像实验

对比仿真图像,实际卫星相机所成图像中不仅存在加性白噪声,还存在因电荷耦合器件(CCD)像元间响应非均匀性造成的条带噪声<sup>[14]</sup>,为进一步对比各方法在实际应用中的优劣,对以下四幅含实际靶标的遥感图像,分别应用四种 ESF 提取方法,通过对水平与垂直方向的有效刃边区域的计算,求出四种方法下的二维 PSF,如图 3 所示。其中,目标 2~4 的条带噪声相比目标 1 稍明显一些。

求出靶标图像的二维 PSF 后,通过维纳滤波反卷积图像复原方法<sup>[9,14-15]</sup>,分别利用四种 PSF 对各图像进行复原。为便于对比复原效果,截取复原后图像的靶标部分进行展示,如图 4 所示。根据细节能量(EOD)、平均梯度(GMG)以及方差(VAR)三种指标分别对复原图像进行质量评价<sup>[16]</sup>,评价结果如表 2 及图 5 所示。

表 2 靶标及其复原图像质量评价结果

Table 2 Quality assessment results of targets and restored images

Index	Target	Original target	SASG method	MSG method	SplineSG method	Spline method
EOD	1	83.5944	122.4131	107.2754	130.4921	130.5081
	2	106.2603	219.8917	157.5025	221.0260	220.2460
	3	30.8328	112.0528	86.6618	112.1936	112.0813
	4	40.6887	156.7111	128.0963	150.6511	150.7938
GMG	1	0.0335	0.0404	0.0382	0.0415	0.0415
	2	0.0333	0.0472	0.0401	0.0458	0.0457
	3	0.0162	0.0264	0.0237	0.0256	0.0256
	4	0.0170	0.0298	0.0269	0.0284	0.0284
VAR	1	0.0135	0.0148	0.0141	0.0149	0.0149
	2	0.0181	0.0208	0.0193	0.0205	0.0205
	3	0.0060	0.0081	0.0075	0.0081	0.0081
	4	0.0073	0.0103	0.0096	0.0101	0.0101

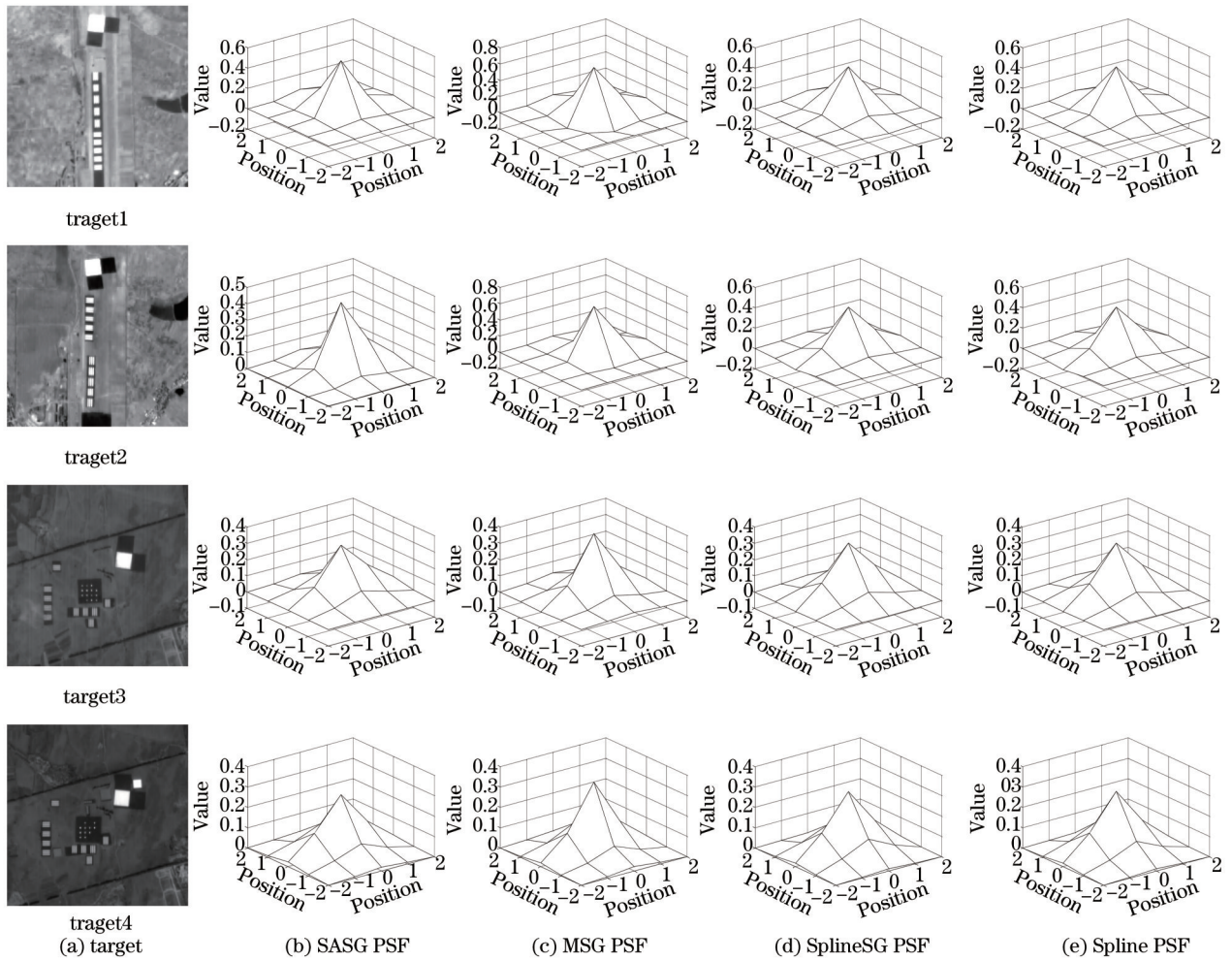


图3 靶标 1~4 及其计算 PSF

Fig.3 Target 1~4 and their caculating PSF

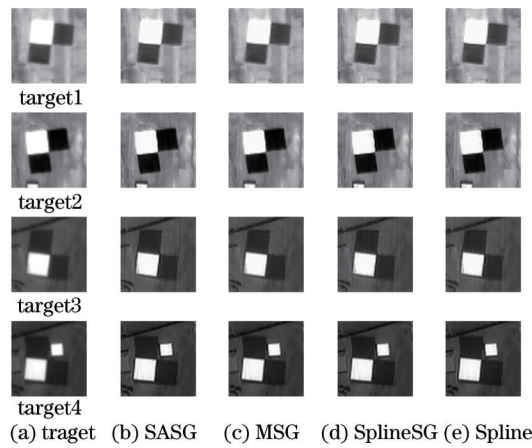


图4 靶标 1~4 及其复原图像

Fig.4 Target 1~4 and their restored images

质量评价结果显示,对目标 1~4,利用 SASG 方法,EOD 分别提升约 46%、107%、263%、285%;GMG 分别提升约 21%、42%、62%、75%;方差分别提升约 10%、15%、36%、41%。利用 MSG 方法,EOD 分别提升约 28%、48%、181%、215%;GMG 分别提升约 14%、20%、46%、58%;方差分别提升约 5%、7%、25%、31%。利用样条方法,EOD 分别提升约 56%、107%、263%及 270%;GMG 分别提升约 23%、37%、57%、67%;方差分别提升约 11%、13%、35%、39%。综合来看,SASG 方法与样条方法的复原效果约为 MSG 方法的 1.5~2 倍,并且,当图像中条带噪

声较为明显时,SASG方法效果略优于样条方法效果。

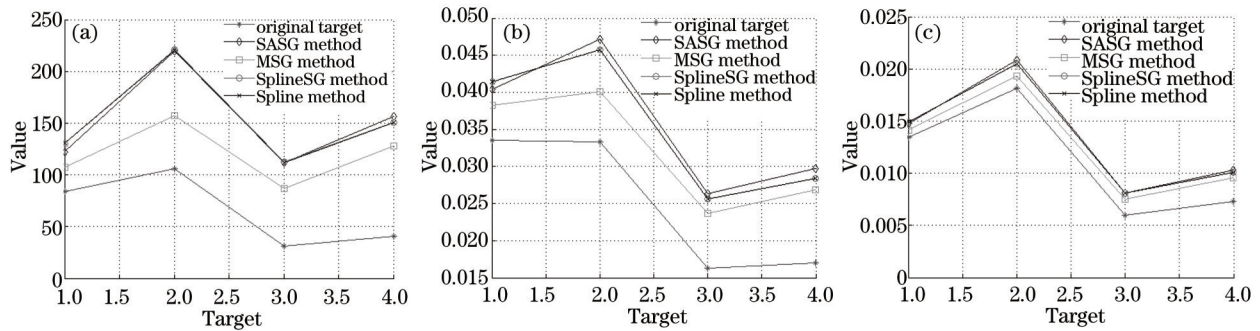


图5 靶标1~4及其复原图像质量评价。(a) 细节能量;(b) 平均梯度;(c) 方差

Fig.5 Target 1~4 and quality assessment of restored image. (a) EOD; (b) GMG; (c) VAR

## 5 结 论

边缘扩散函数的提取方法是刃边法计算卫星相机在轨 LSF/MTF 的关键方法之一。在 MSG 方法的基础上,针对其在仿真实验中出现的误差较大的情况进行改进,提出了 SASG 方法;分别通过仿真实验与实际靶标图像实验对基于样条方法与 SG 平滑方法的四种 ESF 曲线提取方法的效果进行分析比较,证明了 SASG 方法能对 MSG 方法存在的问题进行改进,LSF/MTF 的精度提高约 50%;Spline 方法在仿真实验与实际靶标图像实验中同样有效,且 SG 方法的加入对提高 ESF 曲线提取精度的效果可以忽略;当图像同时存在加性噪声与较明显的条带噪声时,SASG 方法效果能达到甚至略优于样条方法效果。因此,在卫星实际遥感图像 PSF/MTF 的计算以及图像复原中,可根据噪声情况选择 SASG 方法或样条方法作为提取 ESF 曲线的最优方法。

## 参 考 文 献

- Li Xiaobin, Zhou Chunping, Chi Yunfeng. Simulation of in-orbit satellite image MTF measurement using edgedgemethod [J]. Imaging Technology, 2007, 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,2007,6:33-39.
- Zhao Zhanping, Fu Xingke, Huang Qiaolin, *et al.*. On orbit MTF test research of remote sensors based on knife-edge method[J]. Spcaecraft 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.
- Xu Miaozhong, Cong Ming, Fu Xiaomei, *et al.*. Research and evaluation of on-orbit MTF measurement for Chinese satellite sensors[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(4): 8-12.  
许妙忠,从 铭,付晓梅,等.国产卫星传感器在轨MTF检测方法的评价与研究[J].测绘科学,2014,39(4):8-12.
- Xianbin Li, Xiaoguang Jiang, Chuanjie Zhou, *et al.*. An analysis of the knife-edge method for on-orbit MTF estimation of optical sensors[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(17-18): 4995-5010.
- Hwang H, Choi Y W, Kwak S, *et al.*. MTF assessment of high resolution satellite images using ISO 12233 slanted-edge method[C]. SPIE, 2008, 7109: 710905.
- Donovan M, Zhang D, Liu H. Step by step analysis toward optimal MTF algorithm using an edge test device[J]. Journal of X-ray Science and Technology, 2009, 17(1): 1-15.
- Choi T. IKONOS Satellite on Orbit Modulation Transfer Function (MTF) Measurement Using Edge and Pulse Method [D]. Brooking: South Dakota State University, 2002.
- 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相机高精度在轨调制传递函数估算[J].光学学报,2015,35(2):0211003.
- Li Tiecheng, Tao Xiaoping, Feng Huajun, *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.
- Xu Hang, Li Chuanrong, Li Xiaohui, *et al.*. An optimized knife-edge algorithm for on-orbit MTF estimation[J]. Remote Sensing Information, 2012, 27(6): 10-16.

- 徐 航, 李传荣, 李晓辉, 等. 一种优化的刃边法 MTF 在轨评估方法[J]. 遥感信息, 2012, 27(6): 10-16.
- 11 Choi T, Helder D L. Generic sensor modeling for modulation transfer function (MTF) estimation[J]. *Global Priorities in Land Remote Sensing*, 2005: 1-12.
- 12 Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least-squares procedures[J]. *Analytical Chemistry*, 1964, 36(8): 1627-1639.
- 13 Cai Tianjing, Tang Han. Least-square matching principle of savitzky-golay smoothing filter[J]. *Digital Communication*, 2011, 38(1): 63-68.
- 蔡天净, 唐 瀚. Savitzky-Golay 平滑滤波器的最小二乘拟合原理综述[J]. 数字通信, 2011, 38(1): 63-68.
- 14 Guo Lingling, Wu Zepeng, Zhang Liguang, *et al.*. A precise method to measure the on-orbit point spread function of remote sensors[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(3): 284-289.
- 郭玲玲, 吴泽鹏, 张立国, 等. 遥感相机在轨点扩散函数高精度测量方法[J]. 测绘学报, 2014, 43(3): 284-289.
- 15 Li Tiecheng. 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.
- 16 Zhao Huijie, Qin Baolong, Jia Guorui. On-orbit detection for modulation transfer function of hyperspectral remote sensing system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(6): 1235-1243.
- 赵慧洁, 秦宝龙, 贾国瑞. 高光谱遥感系统调制传递函数的在轨测试[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(6): 1235-1243.

栏目编辑: 苏 岑