

卡塞格林光学遥感系统的图像复原

谢丁杰 李铁成 冯华君 李晓彤 徐之海

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 卡塞格林光学遥感系统相当于一个望远系统和环形光阑的组合, 无穷远物的夫琅禾费衍射谱是圆孔衍射和圆屏衍射共同作用的结果。由于系统次镜中心遮拦的影响, 损失了一部分衍射谱, 造成了系统调制传递函数(MTF)在中频段的下降, 影响了成像质量。设计了一个 2 m 焦距的改进型卡塞格林光学系统。为了弥补系统成像质量的损失, 运用调制传递函数补偿(MTFC)技术, 通过倾斜刃边法提取卡塞格林系统所拍摄图像的点扩展函数(PSF), 对退化图像进行复原, 并利用多种客观图像质量评价函数对复原效果进行了评价。实验结果表明, 该方法对于卡塞格林系统成像质量的提高具有良好效果。

关键词 图像处理; 调制传递函数补偿; 倾斜刃边法; 卡塞格林; 中心遮拦

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0611004

Image Restoration of Cassegrain Optical Remote Sensing System

Xie Dingjie Li Tiecheng Feng Huajun Li Xiaotong Xu Zhihai

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Cassegrain optical remote sensing system is a combination of telescope system and annular aperture. Its Fraunhofer diffraction of infinite objects is the joint result of circular hole diffraction and circular screen diffraction. Because of the loss of diffraction due to central obscuration of circular screen, modulation transfer function (MTF) of the system degrades greatly in middle frequency, and this directly affects the imaging quality. A Cassegrain optical remote sensing system is designed whose focal length is 2 m. In order to make up for the loss of the image quality, a modulation transfer function compensation (MTFC) technology is used, in which the point spread function (PSF) of image is obtained by slanted-edge method, to recovery image. Some assessment functions are used to evaluate the recovery results. The experimental results indicate that the image quality is improved obviously.

Key words image processing; modulation transfer function compensation (MTFC); slanted-edge method; Cassegrain; central obscuration

OCIS codes 110.0110; 110.3010; 100.0100; 280.0280

1 引 言

目前国内外各类卫星上的长焦距、高分辨率遥感成像光学系统主要有同轴反射和离轴反射两大类。同轴系统具有结构紧凑、易于高精度加工和装调、系统稳定性高等诸多优点, 成为目前卫星遥感器上使用最多、最为成熟的系统。如目前分辨率最高的商用卫星 GeoEye-1 的光学系统使用的便是全视场三反射镜卡塞格林(FFTC)光学系统^[1]。但是, 同轴反射光学系统的次镜遮挡, 减小了光学系统的

有效通光口径, 导致光学系统调制传递函数(MTF)在中频段明显下降, 影响了遥感图像的质量。随着各国高分辨率对地观测技术的迅速发展, 调制传递函数补偿(MTFC)技术在各国高分辨率对地观测卫星的遥感图像处理方面已经得到了广泛应用。MTFC是指对系统退化过程进行分析, 得出退化模型, 对退化图像进行补偿^[2]。美国的高分辨率卫星 Ikonos-2, QuickBird-2 和 OrbView-3 都应用了 MTFC 技术, 使得遥感图像像质得到了有效提高^[3]。

收稿日期: 2010-12-03; **收到修改稿日期:** 2011-01-17

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724006)、国家 863 计划(2009AA12Z108)和国家自然科学基金(60977010)资助课题。

作者简介: 谢丁杰(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事遥感图像处理方面的研究。E-mail: xiedingjie@gmail.com

导师简介: 冯华君(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理方面的研究。E-mail: fenghj@zju.edu.cn

(通信联系人)

本文研究了卡塞格林中心遮拦系统的成像特性,将 MTF 技术应用于自行设计的卡塞格林系统。利用倾斜刃边法提取系统退化图像的点扩展函数 (PSF),应用于系统仿真图像及实拍图像的复原,并使用多种客观图像评价函数对复原结果进行了评价。实验结果表明,该方法对于卡塞格林系统像质的提高具有显著作用。

2 原 理

2.1 卡塞格林系统

卡塞格林系统是一种同轴反射式的光学成像系统,其主要结构由一个主镜和一个次镜构成。图 1 为一个改进型卡塞格林系统的光路图,入射光线经过主镜反射后,再由次镜反射,经过后部成像透镜到达像面。

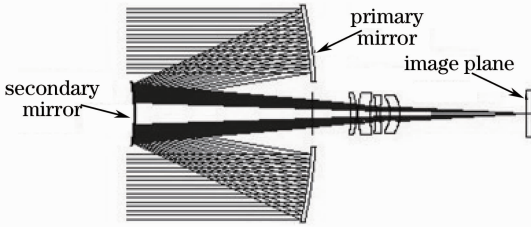


图 1 改进型卡塞格林系统

Fig. 1 Improved Cassegrain optical system

卡塞格林系统相当于一个望远镜系统和环形光阑的组合。在非相干光情况下,对于具有中心遮拦的理想成像系统,无穷远物的夫琅禾费衍射谱是圆孔衍射和圆屏衍射共同作用的结果,即

$$E_a(\xi, \eta) = E_o(\xi, \eta) - E_b(\xi, \eta), \quad (1)$$

式中 $E_a(\xi, \eta)$ 为圆环衍射的复振幅分布, $E_o(\xi, \eta)$ 为圆孔衍射的复振幅分布, $E_b(\xi, \eta)$ 为圆屏衍射的复振幅分布。相应地可得出圆环衍射的光强分布为

$$I = I_0 \left[\frac{2J_1(\varphi_1)}{\varphi_1} - \gamma \frac{2J_1(\varphi_2)}{\varphi_2} \right]^2, \quad (2)$$

式中 $\varphi_1 = kR \sin \theta$, $\varphi_2 = kr \sin \theta$, k 为波数 ($k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长), θ 为衍射角, R 为圆孔半径, r 为遮拦孔半径, $\gamma = r/R$, I_0 为中心光强, $J_1(\varphi)$ 为第一类贝塞尔函数。

为了研究卡塞格林系统的图像退化过程及复原方法,我们设计了一个 2 m 焦距的改进型卡塞格林光学系统。该系统的主镜和次镜均采用抛物面镜,主镜外径 200 mm、内径 60 mm,次镜外径 65 mm,主次镜曲面顶点距离为 168 mm,全视场角为 1.248° 。该系统的 MTF 设计值曲线如图 2 所示。

与普通光学系统的 MTF 曲线相比,卡塞格林

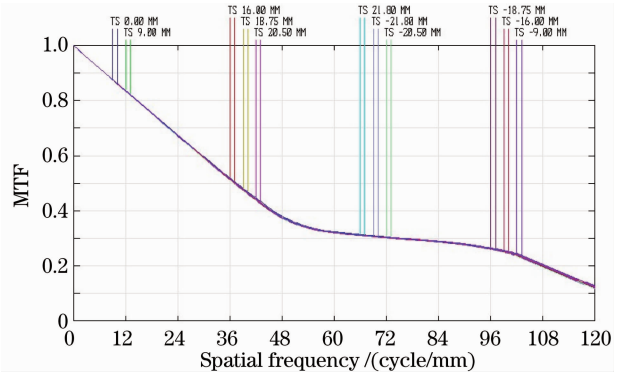


图 2 卡塞格林系统 MTF 设计值曲线

Fig. 2 MTF designed-value curves of Cassegrain system
系统由于次镜圆屏的存在损失了一部分衍射谱, MTF 曲线在中频段有比较明显的下降。

从不同视场的 MTF 曲线看出,该系统中心和边缘视场的 MTF 曲线相差极小,这说明在不同视场处,系统的 PSF 相似,故在以下实验中对整幅图像采用同一复原函数。对于 PSF 随视场变化较大的光学系统,在图像复原过程中,需考虑不同视场处 PSF 不同的影响,图像复原方法可参考陶小平等^[4]提出的图像分块复原方法。

2.2 刃边法 PSF 提取

图像退化过程可以描述为退化函数 $h(x, y)$ 和加性噪声 $n(x, y)$ 对一幅输入图像 $f(x, y)$ 进行作用,得到一幅退化图像 $g(x, y)$ 。退化过程可表示为

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y). \quad (3)$$

将(3)式进行傅里叶变换,可得

$$G(u, v) = F(u, v) \times H(u, v) + N(u, v), \quad (4)$$

式中 $F(u, v)$, $G(u, v)$, $H(u, v)$, $N(u, v)$ 分别是输入图像,输出图像,退化函数和噪声的傅里叶变换。

根据(4)式,很容易得到

$$F(u, v) = \frac{G(u, v) - N(u, v)}{H(u, v)}. \quad (5)$$

换言之,知道了系统的退化函数,加上一定的噪声统计特性估计,就可以通过输出图像计算出原始的输入图像。系统退化函数的估计从而成为图像复原的关键。有多种方法可以用于获得系统的退化函数,如电光源法、狭缝法和刃边法等。其中刃边法对光源和目标的要求都不高,并且通过倾斜刃边,可以得到系统的上采样 PSF,提高了计算精度^[5]。P. B. Greer 等^[6]又对标准倾斜刃边法进行了改进,进一步提高了计算的准确性。下面简要介绍从退化图像中利用倾斜刃边法求取 PSF 的步骤^[7,8]。

1) 在光学系统所成图像中选取合适的倾斜刃边区域(如机场跑道、公路和海岸线等),作为系统的

边缘扩展函数(ESF),如图 3(a)所示;

2) 计算 x 方向上每行 ESF 的导数,得到 x 方向的线扩展函数(LSF),如图 3(b)所示;

3) 计算刃边区域中每行 LSF 的重心位置,作为边缘位置,并对这些边缘位置进行线性拟合得到刃边直线准确位置;

4) 将刃边区域中的所有像素点沿着拟合得到刃边直线的方向投影到同一行上,取原有采样间隔

的 $1/4$ 作为新的采样间隔,计算落在同一采样间隔中的所有像素点的平均值并将其作为该采样间隔的数据信息,得到一条平均上采样 ESF 曲线;

5) 通过对平均上采样 ESF 求导可得平均上采样 LSF;

6) 在假设系统具有轴对称性的前提下,将 LSF 叉乘 LSF 的转置,得到系统的 PSF,并对 PSF 进行归一化处理,用于图像复原。

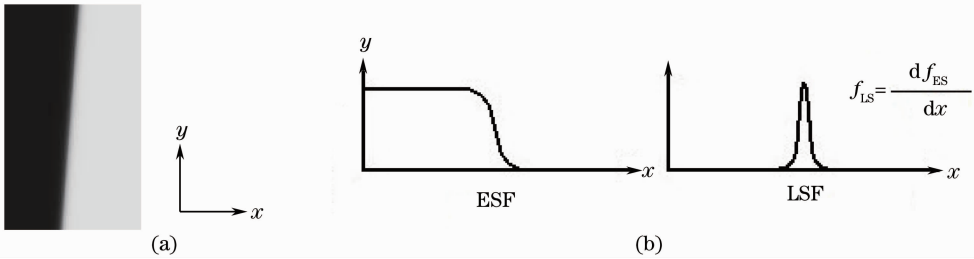


图 3 (a)刃边图像,(b) LSF 计算步骤
Fig. 3 (a) Edge image, (b) calculation of LSF

3 仿真实验

从 Zemax 软件读取卡塞格林系统 PSF 设计值,对输入图像进行卷积,得到仿真退化图像。选取退化图像中两块反射率相差较大的地块作为刃边图像,利用倾斜刃边法求取系统的 PSF,用于图像复原。

以下实验对比了经典 Lucy-Richardson(RL)算法及 JM Bioucas-Dias 全变分复原(TV)算法^[9]的复原效果。RL 算法运算效率较高,而 TV 算法对于复原过程中噪声放大及 PSF 预测偏差导致的振铃现象有更好的抑制作用。

对于复原图像的质量,除了靠人眼进行主观评价之外,客观的评价也是不可缺少的。本文分别使用有参考和无参考两类评价函数进行评价:1)有参考评价函数包括基于类似性的像质评价法(SSIM)^[10],基于梯度的像质评价法(GRM)^[11]及基于区域权重和人眼视觉特性的像质评价法(HVSWG)^[12];2)无参考评价方法包括灰度平均

梯度像质评价法(GMG),最大熵像质评价法(LE)及基于模糊度和噪声水平的图像质量评价方法(BN)^[13]。以上评价方法中,除了 BN 以外,其余均是评价值越高,图像质量越好。实验中对以上几种评价函数的效果进行了比较。图 4,图 5,表 1 和表 2 给出了标版图像与机场图像的复原效果。

从上述两组图像复原结果可以看出,图像的清晰度有了明显的提高。3 个有参考型评价函数的结果均与人眼主观感受相一致,3 个无参考型评价函数中,LE 评价函数结果与人眼感受稍有差异,复原图像得分高于原始图像,GMG 与 BN 函数评价结果良好。

考虑到在现实拍摄中,由于曝光时间及传感器等因素的影响,所获得的图像很可能受到噪声的污染,下面我们对图像添加了高斯噪声,模拟在噪声干扰下 PSF 提取的准确性及其对图像复原的影响。结果如图 6,图 7,表 3 和表 4 所示。

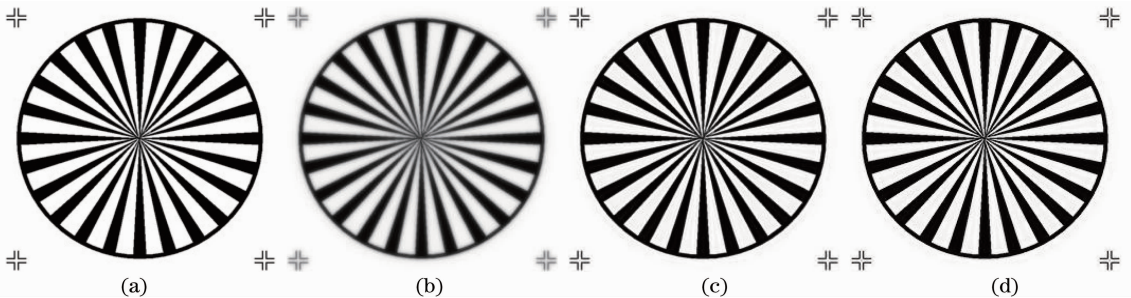


图 4 标版 1(a)原图,(b)模糊图,(c) RL 迭代复原图,(d) TV 算法复原图

Fig. 4 Resolution 1 (a) Original image, (b) blur image, (c) restored image by RL iteration, (d) Restored image by TV algorithm

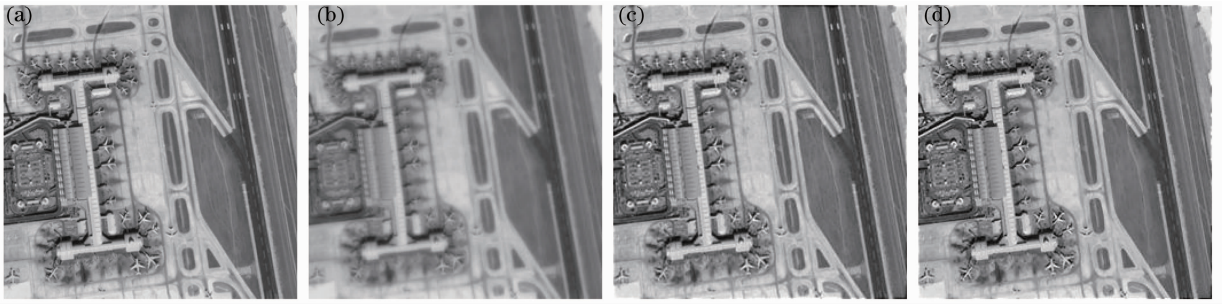


图 5 机场(a)原图, (b)模糊图, (c) RL 迭代复原图, (d) TV 算法复原图

Fig. 5 Airport (a) Original image, (b) blur image, (c) restored image by RL iteration, (d) restored image by TV algorithm

表 1 图 4 的图像复原效果评价

Table 1 Quality assessment of image recovery for Fig. 4

Method	SSIM	GRM	HVSWGGM	GMG	LE	BN
Original	1.000	1.000	1.000	20.070	3.925	5.984
Blur	0.813	0.764	0.928	13.890	3.656	21.806
RL	0.971	0.870	0.998	19.883	4.717	10.559
TV	0.969	0.884	0.997	20.895	4.451	7.061

表 2 图 5 的图像复原效果评价

Table 2 Quality assessment of image recovery for Fig. 5

Method	SSIM	GRM	HVSWGGM	GMG	LE	BN
Original	1.000	1.000	1.000	13.530	7.390	4.548
Blur	0.841	0.809	0.926	6.463	7.168	9.104
RL	0.989	0.982	0.997	13.767	7.433	4.974
TV	0.983	0.975	0.997	13.183	7.420	6.388

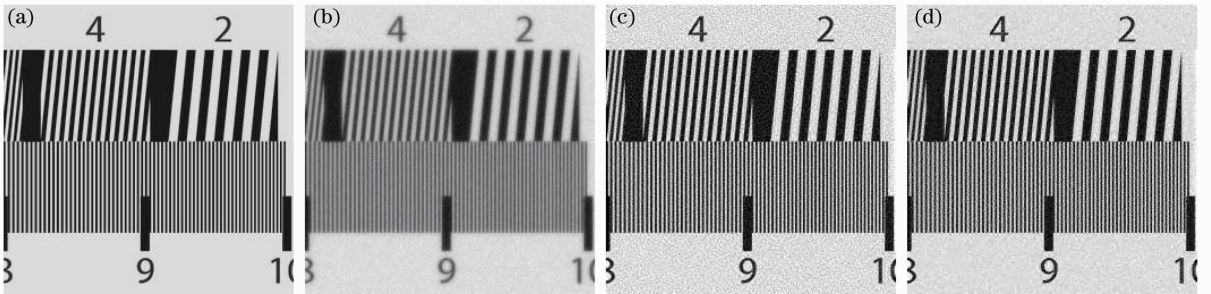


图 6 标版 2(a)原图, (b)模糊图, (c) RL 迭代复原图, (d) TV 算法复原图

Fig. 6 Resolution 2 (a) Original image, (b) blur image, (c) restored image by RL iteration, (d) restored image by TV algorithm



图 7 房子(a)原图, (b)模糊图, (c) RL 迭代复原图, (d) TV 算法复原图

Fig. 7 House (a) Original image, (b) blur image, (c) restored image by RL iteration, (d) restored image by TV algorithm

表 3 图 6 的图像复原效果评价

Table 3 Quality assessment of image recovery for Fig. 6

Method	SSIM	GRM	HVSWGGM	GMG	LE	BN
Original	1.000	1.000	1.000	34.213	5.434	2.028
Blur	0.716	0.541	0.877	17.617	7.386	5.623
RL	0.736	0.682	0.956	42.753	7.395	3.854
TV	0.859	0.699	0.959	35.625	7.103	4.861

表 4 图 7 的图像复原效果评价

Table 4 Quality assessment of image recovery for Fig. 7

Method	SSIM	GRM	HVSWGGM	GMG	LE	BN
Original	1.000	1.000	1.000	15.183	7.405	4.553
Blur	0.797	0.810	0.927	7.573	7.216	7.206
RL	0.857	0.923	0.990	18.577	7.466	4.330
TV	0.883	0.936	0.992	17.404	7.437	4.622

图 6(a)模糊图的信噪比(SNR)为 29.17,图 7(a)模糊图的 SNR 为 30.34。对于受噪声污染的图像,噪声在复原过程中都受到一定程度的放大,这对复原图像产生了影响。但是,复原图像中并未明显地产生由于 PSF 估计不准确造成的振铃现象,这表明刃边法在提取 PSF 的过程中具有较好的抗噪能力。

从复原算法上来看,RL 算法在复原过程中对噪声的放大相对比较严重,而 TV 算法对于噪声和振铃的抑制有一定作用,但也不可避免地带来了图像细节的损失。

在有噪声干扰的情况下,有参考型评价函数对于复原结果的评价仍然取得了与人眼主观感受的一致性;无参考型评价函数中,LE 评价函数在噪声大的情况下出现了较严重的偏差,GMG 和 BN 评价函数比较好地表征了复原效果,特别是 BN 评价函数,由于综合考虑了噪声和模糊度的影响,评价结果相当符合人眼主观感受。

4 实 验

使用设计制造的 2 m 焦距的卡塞格林镜头对目标景物分别在正常感光度(ISO)和高感光度情况

下进行了实拍实验。图 8,图 9,表 5 和表 6 是标版图像与遥感图像的实验结果。

从以上复原结果来看,图像的分辨率有了明显的提高,分辨率板图像中,800 line 对位置的线条经过复原后能够清晰辨认;遥感图像中主建筑物顶部的气泡结构在复原后也能明显呈现。

图 10,图 11,表 7 和表 8 是在高 ISO(3200)情况下的实验结果。图 10(a)模糊图的 SNR 为 29.85,图 11(a)模糊图的 SNR 为 31.43。

表 5 图 8 的图像复原效果评价

Table 5 Quality assessment of image recovery for Fig. 8

Method	LE	GMG	BN
Blur	5.691	4.149	14.927
RL	5.828	6.920	6.536
TV	5.677	6.961	12.293

表 6 图 9 的图像复原效果评价

Table 6 Quality assessment of image recovery for Fig. 9

Method	LE	GMG	BN
Blur	6.065	1.201	55.298
RL	6.233	3.443	11.057
TV	6.325	5.489	10.677

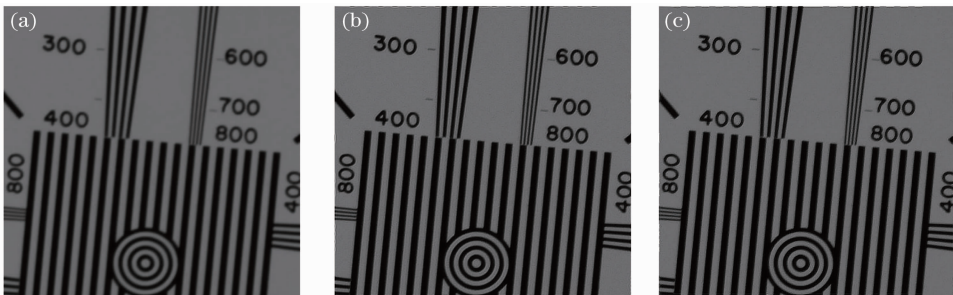


图 8 正常 ISO 下的标版图。(a)模糊图,(b) RL 迭代复原图,(c) TV 算法复原图

Fig. 8 Resolution image in normal ISO. (a) Blur image, (b) restored image by RL iteration, (c) restored image by TV algorithm

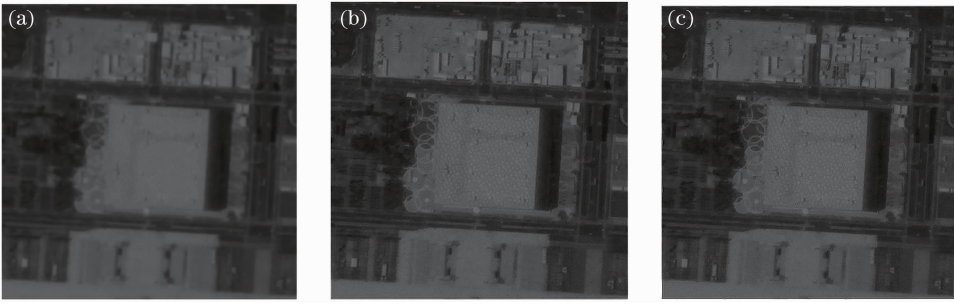


图 9 正常 ISO 下的遥感图。(a)模糊图,(b) RL 迭代复原图,(c) TV 算法复原图

Fig. 9 Remote sensing image in normal ISO. (a) Blur image, (b) restored image by RL iteration, (c) restored image by TV algorithm

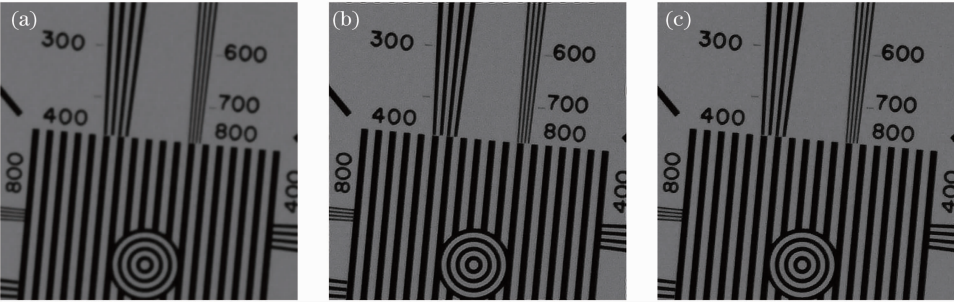


图 10 高 ISO 下的标版图。(a)模糊图,(b) RL 迭代复原图,(c) TV 复原图

Fig. 10 Resolution image in high ISO. (a) Blur image, (b) restored image by RL iteration, (c) restored image by TV algorithm

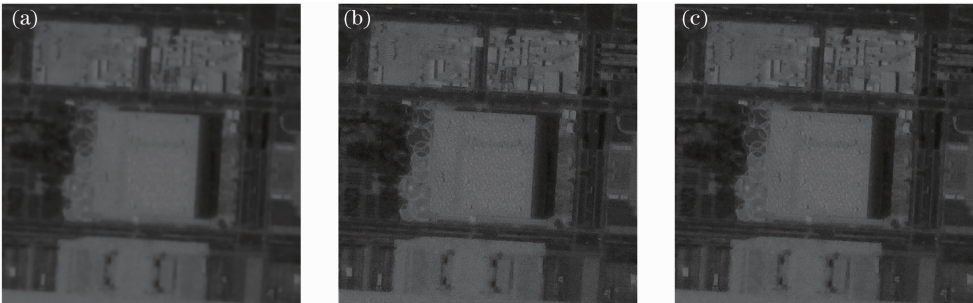


图 11 高 ISO 下的遥感图。(a)模糊图,(b) RL 迭代复原图,(c) TV 复原图

Fig. 11 Remote sensing image in high ISO. (a) Blur image, (b) restored image by RL iteration, (c) restored image by TV algorithm

表 7 图 10 的图像复原效果评价

Table 7 Quality assessment of image recovery for Fig. 10

Method	LE	GMG	BN
Blur	5.829	4.332	64.497
RL	5.972	7.989	5.712
TV	5.988	6.881	6.632

表 8 图 11 的图像复原效果评价

Table 8 Quality assessment of image recovery for Fig. 11

Method	LE	GMG	BN
Blur	6.105	1.256	47.160
RL	6.299	4.424	12.731
TV	6.220	3.192	13.020

从结果来看,高 ISO 感光度带来的噪声并未对复原产生明显影响。对于 4 组实拍图像,3 个客观评价函数都明显反映出复原图像质量的提升。

5 结 论

介绍了一种利用倾斜刃边法提取退化图像 PSF 用于卡塞格林光学系统图像复原的方法。针对卡塞格林光学遥感系统所拍摄的遥感图像存在中频段 MTF 偏低的缺陷,可以在地面处理时利用 MTFC 技术进行补偿。本文分析了卡塞格林系统的成像特性,并对倾斜刃边法提取 PSF 的方法进行了介绍,设计并加工制造了一个 2 m 焦距的改进型卡塞格

林光学系统。在进行实拍实验之前,先通过仿真实验对比了不同复原算法及各类评价方法的有效性,进而利用镜头对遥感图像进行了实拍实验。实验结果表明,MTFC 技术对于卡塞格林遥感图像像质的提高具有有效的作用,图像质量有明显提升。同时,客观评价函数结果也有力支持了以上结论。

参 考 文 献

- 1 Qu Hongsong, Jin Guang, Zhang Ye. NextView Program and progress in optical remote sensing satellites[J]. *Chin. J. Opt. Appl. Opt.*, 2009, **2**(6): 467~476
曲宏松,金光,张叶.“NextView 计划”与光学遥感卫星的发展趋势[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, **2**(6): 467~476
- 2 H. Hwang, Y. W. Choi, S. Kwak *et al.*. MTF assessment of high resolution satellite images using ISO 12233 slanted-edge method[C]. *SPIE*, 2008, **7109**: 710905
- 3 Man Yiyun, Chen Shiping, Liu Zhaojun *et al.*. Study on MTF compensation application to the optimization design of optical remote sensing imaging system [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2007, **28**(4): 39~47
满益云,陈世平,刘兆军等. MTFC 在光学遥感成像系统优化设计中的应用研究[J]. *航天返回与遥感*, 2007, **28**(4): 39~47
- 4 Tao Xiaoping, Feng Huajun, Lei Hua *et al.*. A splicing method of sectioned restoration algorithm for images with space-variant point spread function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 648~653
陶小平,冯华君,雷华等. 一种空间变化 PSF 图像分块复原的拼接方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 648~653
- 5 Stephen E. Reichenbach, Stephen K. Park, Ramkumar Narayanswamy. Characterizing digital image acquisition devices [J]. *Opt. Engng.*, 1991, **30**(2): 170~177
- 6 P. B. Greer, T. van Doorn. Evaluation of an algorithm for the assessment of the MTF using an edge method[J]. *Med. Phys.*, 2000, **27**(9): 2048~2059
- 7 Li Tiecheng, Tao Xiaoping, Feng Huajun *et al.*. MTF Calculation and image restoration based on slant-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
- 8 Li Tiecheng, Feng Huajun, Xu Zhihai *et al.*. New analytical line spread function fitting model for modulation transfer function calculation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3454~3459
李铁成,冯华君,徐之海等. 一种可用于调制传递函数计算的新型线扩展函数拟合模型[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3454~3459
- 9 J. M. Bioucas-Dias, M. Figueiredo, J. P. Oliveira. Total variation-based image deconvolution: a majorization-minimization approach [C]. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2006, 861~864
- 10 Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, **13**(4): 600~612
- 11 Zhao Jufeng, Tao Xiaoping, Feng Huajun *et al.*. Gradient based ripple image quality assessment [J]. *J. Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010, **44**(5): 870~874
赵巨峰,陶小平,冯华君等. 基于梯度的波纹图像质量评价[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, **44**(5): 870~874
- 12 Zhao Jufeng, Feng Huajun, Xu Zhihai *et al.*. Image Quality Assessment Based on Regional Weights and Human Visual Properties[P]. China, CN101562758. 2009-10-21
赵巨峰,冯华君,徐之海等. 基于区域权重和 human 视觉特性的图像质量客观评价方法[P]. 中国, CN101562758. 2009-10-21
- 13 Zhao Jufeng, Feng Huajun, Xu Zhihai *et al.*. Image quality assessment based on blurring and noise level [J]. *J. Optoelectronic Laser*, 2010, **21**(7): 1062~1066
赵巨峰,冯华君,徐之海等. 基于模糊度和噪声水平的图像质量评价方法[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(7): 1062~1066