文章编号　1674-2915(2013)06-0856-07

基于图像复原的高光谱图像前向像移补偿

曹海霞[1,2],巴音贺希格[1*],崔继承[1],张永超[1,2]
(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:为了提高高光谱图像空间维的图像分辨力,针对航空遥感器成像时由前向像移造成的图像模糊提出了像移补偿方法。分析了航空遥感器前向像移造成图像模糊的退化机制,对运动模糊图像进行了预处理;估计了点扩散函数和噪声功率,使用改进的维纳滤波算法对图像进行复原并以绝对平均误差、峰值信噪比作为评价标准进行了实验。在估计出模糊图像点扩散函数和噪声功率的情况下得到的结果显示:与传统的维纳滤波复原算法相比,改进的维纳滤波复原算法的图像绝对平均误差降低了 9.31%,峰值信噪比提高了 13.98%,表明提出的算法能够有效改善高光谱图像的像质。

关　键　词:高光谱图像;前向像移;图像复原;维纳滤波算法
中图分类号:TP751; TP391.4　　**文献标识码**:A　　doi:10.3788/CO.20130606.0856

Forward image motion compensation of hyper spectral image based on image restoration

CAO Hai-xia[1,2], Bayaiheshig[1*], CUI Ji-cheng[1], ZHANG Yong-chao[1,2]
(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*: *bayin*888@*sina. com*

Abstract: To improve the image resolution of a hyper spectral image, an image motion compensation algorithm was proposed. The mechanisms of image degradation caused by forward image motion were analyzed and a digital Image Motion Compensation (IMC) was adopted to restore the blurred image. Then, the Point Spread Function (PSF) and noise power were estimated, and the improved algorithm of Wiener filtering was selected to restore the blurred image. By taking the average absolute error and the peak signal to noise ratio as the evaluation criteria, the proved experiments were performed. Experimental results under the known quality of PSF and noise power show that the absolute average error of the image for improved Wiener filtering algorithm decreases by 9.31% and the peak signal to noise ratio increases by 13.98% as compared to the traditional Wiener filter. It is concluded that the quality of the hyper spectral image can be improved effectively by the pro-

收稿日期:2013-10-12;**修订日期**:2013-11-29
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61108032);中国科学院重大科研装备研制资助项目(No. YZ200804);国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 11YQ120023);吉林省重大科技攻关资助项目(No. 09ZDGG005);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20126012)

posed algorithm.

Key words: hyper spectral image; forward image motion; image restoration; Wiener filtering algorithm

1　引　言

航空遥感器在对目标成像时,飞行器的运动、振动和相机的摆动会在曝光时间内使感光介质与被照物影像间产生相对运动,造成成像模糊或拖尾效应即形成像移。像移按产生的原因可以分为前向像移、姿态像移、振动像移等[1-5]。像移的存在极大地影响了高光谱图像的成像质量,导致图像边缘模糊、灰度失真,对比度和分辨率下降[6-9]。以美国 KS-146 航空侦察相机为例,其前向像移在 10^{-3} 数量级,而其他像移则在 10^{-4} 数量级,可见在退化图像中前向像移起了主导作用[10]。因此,如何消除由前向像移导致的图像模糊将是像移补偿方法研究的重点内容。传统的补偿手段如光学式补偿、机械式补偿及电子式补偿等硬件补偿方法,都可以有效地减小像移,但是硬件补偿方法都需要精密的光机结构和复杂的控制系统,使得遥感器的复杂度、体积和质量增加,不利于遥感器小型化、轻型化、无移动部件的发展趋势。近年来,随着 CCD 等传感器件的广泛应用及精度的提高,图像式像移补偿方法已成为研究的重点[3],目前消除图像模糊最有效的方法是进行图像复原。为了方便起见,传统的图像复原方法都忽略了噪声的影响,然而噪声干扰将导致某些复原算法失效或严重影响复原精度。

鉴于此,本文从研究航空遥感器成像时前向像移产生的原因出发,综合各种复原方法,提出了基于图像复原的图像前向像移补偿方法。首先建立了运动图像退化数学模型,对运动模糊图像进行图像预处理;然后精确估计退化图像的点扩散函数和噪声信息,对维纳滤波进行改进;最后使用改进的算法对图像进行复原。实验验证显示,与逆滤波和传统维纳滤波复原方法相比,该方法复原结果有较大改善。

2　图像式像移补偿方法

2.1　图像退化数学模型

航空遥感器在拍照时,每帧的曝光时间极短,在曝光时间内飞机的飞行方式可以认为是匀速直线运动,因此航空遥感器在拍照时前向像移的形成等效于拍摄目标与航空遥感器间的匀速直线运动造成的图像模糊[1]。

图像复原的首要任务是对图像的退化过程进行数学建模[11-12],前向像移导致图像退化的数学模型如图 1 所示。

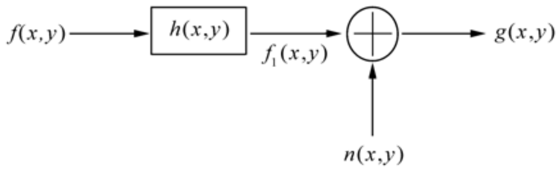


图 1　图像退化数学模型

Fig. 1　Mathmatical model of image degradation

原图像 $f(x,y)$ 经过退化系统 $h(x,y)$ 之后的图像为 $f_1(x,y)$,即

$$f_1(x,y) = f(x,y) * h(x,y)\ . \qquad (1)$$

进一步考虑噪声 $n(x,y)$ 的影响,则退化之后的模糊图像 $g(x,y)$ 为:

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y) + n(x,y)\ , \qquad (2)$$

式中,$*$ 表示卷积,$n(x,y)$ 为加性噪声。通常情况下噪声可以假设为均值为 0 的高斯白噪声,且与图像 $f(x,y)$ 不相关。$h(x,y)$ 称为点扩散函数(Point Spread Function, PSF),概括了退化系统的物理过程。

图像复原就是已知 $g(x,y)$,从式(2)所示的模型中求出 $f(x,y)$,关键是如何求出退化系统的点扩散函数 $h(x,y)$ 和加性噪声的功率 $n(x,y)$。为了便于计算机处理,在图像复原过程中,往往采用线性空间不变系统来近似表达图像的退化环境。

2.2　维纳滤波复原算法的改进

在图像复原技术中,根据理想图像先验信息的数量和特征,人们提出了很多行之有效的复原方法[13-14],如逆滤波、维纳滤波、正则滤波、L-R 迭代算法等。其中维纳滤波具有较好的去噪性能,

使得原图像$f(x,y)$与复原图像$\hat{f}(x,y)$之间的均方误差最小,在实际应用中被广泛采用。维纳滤波器的数学表达式如式(3)所示:

$$\hat{F}(u,v) = \left\{\frac{H*(u,v)}{|H(u,v)|^2 + \gamma[S_n(u,v)/S_f(u,v)]}\right\} G(u,v) =$$

$$\left\{\frac{1}{H(u,v)} \cdot \frac{|H(u,v)|^2}{|H(u,v)^2| + \gamma[S_n(u,v)/S_f(u,v)]}\right\} G(u,v) \ , \quad (3)$$

式中,$u=0,1,2,\cdots,M-1$,$v=0,1,2,\cdots,N-1$。$F(u,v)$、$\hat{F}(u,v)$、$G(u,v)$、$N(u,v)$和$H(u,v)$分别表示$f(x,y)$、$\hat{f}(x,y)$、$g(x,y)$、$n(x,y)$和$h(x,y)$的傅里叶变换。$H^*(u,v)$是$H(u,v)$的共轭函数。$S_f(u,v)$和$S_n(u,v)$分别表示源图像和噪声的频谱密度。当$\gamma=1$时,式(3)所示的滤波器为维纳滤波器。

由维纳滤波器的数学表达式(3)可知,只要估计出退化系统的点扩散函数和噪声信息,即可使用维纳滤波来复原模糊图像。但是通常情况下,$S_f(u,v)$和$S_n(u,v)$是未知的,人们便把维纳滤波器近似为:

$$\hat{F}(u,v) \approx \left[\frac{H*(u,v)}{|H(u,v)|^2 + K}\right] G(u,v) \ , \quad (4)$$

式中,K是根据信噪比确定的常数,取值一般在0.000 1到0.01之间[15],此时的维纳滤波器即为传统的维纳滤波器。此复原方法可使得模糊图像在一定程度上得到恢复,但是很难实现最佳恢复。为了进一步提高复原图像的质量,本文对维纳滤波器做出改进。改进复原算法未采用传统的维纳滤波器。众所周知,图像的功率谱密度是其自相关函数的傅里叶变换,根据这一关系可以计算出模糊图像噪声信息的自相关函数和预处理后图像的自相关函数,从而计算出模糊图像噪声的频谱密度和预处理后图像的频谱密度,把这两个频谱密度函数应用到传统的维纳滤波复原算法式(3)中,即可实现维纳滤波算法的改进。使用改进的维纳滤波复原算法,可以有效提高复原图像的质量。

2.3 复原参数估计

运动模糊图像的复原分为两种情况:系统的PSF已知的情况和未知的情况。由于大气扰动、光学系统的像差、相机和目标之间的相对运动等多种因素的影响,系统的点扩散函数往往是未知的,这就需要用某种先验知识在系统的点扩散函数未知时进行估计,然而这种先验知识并不容易取得也不够精确,所以就要在对已模糊图像分析和处理的基础之上估计最逼近的PSF。由式(2)可知,从运动模糊图像复原出源图像的关键是获取点扩散函数和噪声功率,在点扩散函数和噪声功率已知的情况下,就可以利用改进的维纳滤波器对模糊图像进行复原。

2.3.1 点扩散函数的估计

模糊图像涉及噪声的影响,所以在估计点扩散函数之前需要对模糊图像进行图像预处理。小波具有多分辨、多分析、算法简单,无需估计小波阈值,能够清晰保持图像边缘等特点,故这里采用小波去噪的方法对带有噪声影响的模糊图像进行图像预处理,然后再对预处理之后的图像进行点扩散函数估计。

在图像式像移补偿技术中,点扩散函数是影响复原结果的关键因素,模糊距离和模糊方向是确定退化系统点扩散函数的两个重要参数。因拍摄图像的曝光时间极短,所以由前向像移造成的图像模糊等效于匀速直线运动造成的图像模糊,不存在模糊方向问题,只需估计点扩散函数的模糊距离即可。

估计运动模糊图像的模糊距离有两种方法:频域估计和空域估计。频域估计方法对噪声敏感,当没有噪声或是只有轻微噪声的情况下,频域方法尚可准确估计模糊距离,但是在噪声污染较严重的情况下,频域方法几乎不能对模糊距离进行识别。不过空域估计可以准确地估计识别点扩散函数的模糊距离,并具有一定的抗噪能力[16]。本文采用空域估计方法估计运动模糊图像的模糊距离[17]。首先需要定义图像的方向微分,定义图像任意角度的方向微分,并引入方向亚像素的概念。此时,微分方向上的相邻像素可能不再是整

数下标的真实图像像素。设像素 $f(i,j)$ 在方向 α 上的相邻像素为 $f_{[\alpha]}(i',j')$,称之为 α 方向亚像素,则 α 方向微分为:

$$\Delta f(i,j)_{[\alpha]} = f_{[\alpha]}(i',j') - f(i,j) . \qquad (5)$$

由于前向像移造成的模糊图像的角度 $\alpha = 0$,即沿水平向右。此时,图像的方向微分为:

$$\Delta f(i,j)_{[0]} = f(i,j+1) - f(i,j) , \qquad (6)$$

式中,i 代表图像行,j 代表图像列。图像大小为 M 行 N 列,则 $1 \leqslant i \leqslant M, 1 \leqslant j \leqslant N-1$,规定 $\Delta f(i,N)_{[0]} = 0$。

运动方向上,模糊图像的相邻像素之间具有较强的相似性。由式(6)的定义,水平向右的方向微分的计算是相邻两像素灰度值之间的减法运算。方向微分实际上也是一个矢量,且该矢量的方向也是水平向右,与运动模糊方向保持一致。$\Delta f(i,j)_{[0]}$ 此时可简记为 $\Delta(i,j)$。图像经过式(6)运算的结果称为微分图。$\Delta(i,j)$ 在水平向右方向上抑制了图像平滑区域并突出边界信息。对于微分图中运动模糊的影响可以采用自相关运算进行分析。对微分图中的像素定义运动方向上的自相关运算,具体到水平方向则是计算图像的行像素自相关。

$$R_{L_i}(q) = \sum_{p=-N}^{N} L_i(p+q) L_i(p) , \qquad (7)$$

式中,$-N \leqslant q \leqslant N$;$L_i(k)$ 代表微分图中第 i 行第 k 列像素灰度值,当 $1 \leqslant k \leqslant N$ 时,$L_i(k) = \Delta(i,k)$;并规定 $L_i(k)$ 超出微分图范围时的取值为 0,即 $k \leqslant 0$ 或者 $k > N$ 时,$L_i(k) = 0$。空域估计模糊距离的流程框图如图 2 所示。

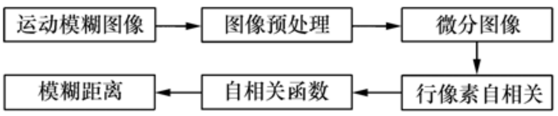


图 2　空域估计模糊距离流程框图

Fig. 2　Flow chart of estimating blurred distance in air-space

由于运动模糊的影响,微分图像自相关曲线在与零点一定距离的位置会出现极小值,如图 3 所示,极小值与零点之间的距离即可表示运动模糊距离。

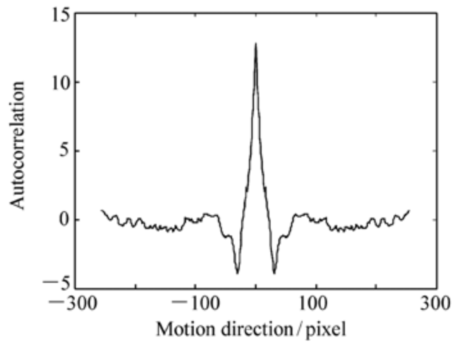


图 3　自相关函数曲线

Fig. 3　Curve of autocorrelation function

2.3.2　噪声功率估计

大部分复原方法认为噪声是随机的且幅值有限,都采取忽略噪声的方法。但是噪声的干扰会导致部分复原方法失效或是影响鉴别精度,因此对噪声信息的估计必不可少。本文采用的方法是预先估计图像的点扩散函数模糊距离,求出点扩散函数,然后根据模糊距离,精确估计模糊图像的噪声功率。

噪声通常假设为均值为 0 的高斯白噪声,那么噪声平均功率(也就是噪声方差)就是噪声最重要的信息。针对匀速直线运动模糊图像,采用差分噪声功率估计方法[18],得到预处理后的模糊图像与噪声方差存在如式(8)数量关系:

$$\sigma^2[P(x)] \approx \frac{1}{3}\frac{N}{a}\sigma^2 , \qquad (8)$$

式中,$P(x)$ 为经过预先处理的噪声模糊图像,σ^2 为噪声方差,即噪声功率;a 为点扩散函数模糊距离。通过该数量关系可以估计出模糊图像的噪声功率。

3　实验验证

实验数据来源于美国推进实验室(JPL)研制的机载可见红外成像光谱仪(AVIRIS)得到的 0.4 ~ 2.45 μm 波段的空间维图像。图像大小为 600 × 400,如图 4 所示。采用本文的图像复原方法对带有不同像移量、不同噪声功率的高光谱图像进行点扩散函数及噪声功率的估计,估计结果

如表1所示。

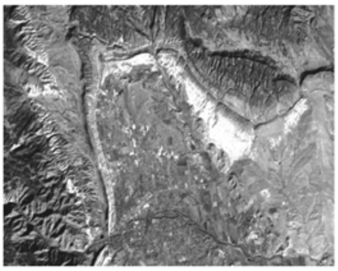


图4　原图像

Fig. 4　Original image

表1　不同像移量、噪声功率的估计结果

Tab. 1　Estimated results of different motions and noise powers

像移量 /pixel	噪声 功率	估计模糊距离 /pixel	估计噪声 功率
10	0.001 0	11	0.001 1
	0.005 0	11	0.005 0
	0.010 0	10	0.009 9
20	0.001 0	19	0.001 1
	0.005 0	19	0.005 1
	0.010 0	19	0.010 1
30	0.001 0	32	0.001 1
	0.005 0	31	0.005 1
	0.010 0	30	0.010 0

由表1的数据可以看出,采用空域估计点扩散函数模糊距离的误差可以控制在2 pixel以内,采用差分噪声功率估计方法可以精确估计噪声功率。

本文仅以像移量为20 pixel,噪声功率为0.005的模糊图像为例,根据估计的点扩散函数模糊距离和噪声功率,计算预处理后图像及噪声信息的自相关函数。分别采用逆滤波、传统维纳滤波和改进的维纳滤波对模糊图像进行复原。模糊图像如图5所示,复原图像如图6、7、8所示。目前还没有一种通用的、权威的图像评价函数,在对图像质量评价进行评价时,本文采用客观评价方法,以平均绝对误差(MAE)和峰值信噪比(PSNR)作为评价标准,如表2所示。

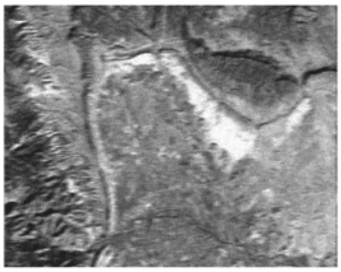


图5　模糊图像

Fig. 5　Blurred image

图6　逆滤波复原图像

Fig. 6　Restored image by inverse filtering

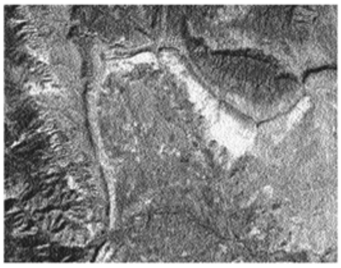


图7　传统维纳滤波复原图像

Fig. 7　Restored image by Wiener filtering

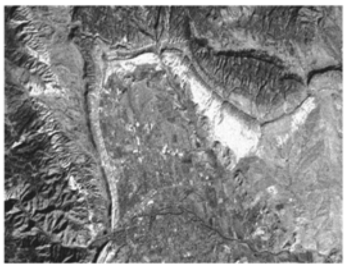


图8　本算法复原图像

Fig. 8　Restored image by proposed algorithm

由表2的数据可以看出,相比逆滤波复原算法和传统的维纳滤波复原算法,本文改进的维纳滤波复原算法使得图像的复原质量得到很大提高。改进的维纳滤波复原算法比传统的维纳滤波复原算法使复原图像的MAE降低了9.31%,PSNR提高了13.98%。

表2　不同复原方法的 MAE、PSNR 对比

Tab. 2　MAEs and PSNRs of different restoring methods

评价标准	逆滤波	传统维纳滤波	本算法
MAE	0.326 8	0.095 18	0.086 316
PSNR	7.036	18.271 4	20.826 3

4　结　论

航空成像过程中,前向像移起主导作用,是像移补偿的主要方向。本文提出了利用图像复原技术对像移进行补偿的方法。该方法根据运动图像退化模型,针对匀速直线运动模糊图像,使用小波去噪对图像进行预处理;采用空域估计方法估计点扩散函数模糊距离,差分噪声功率估计方法精确估计噪声功率。最后利用改进的维纳滤波对模糊图像进行复原。复原结果显示,相比传统维纳滤波复原算法,本文算法复原的图像的绝对 MAE 降低了 9.31%,PSNR 提高了 13.98%。由此可见,改进的维纳滤波复原算法可以有效地提高成像质量,增加图像分辨率,得到更为理想的效果。实验证明了本文提出的复原方法的有效性,在没有先验知识的情况下,该方法能够相当准确地估计模糊图像的点扩散函数模糊距离和噪声功率。

参考文献:

[1] 刘明. 基于图像复原的航空摄影前向像移检测及补偿技术研究[D]. 长春:中国科学院光学精密机械与物理研究所,2005.
LIU M. Research on detection and compensation technology of forward image motion in aerial photography[D]. Changchun:Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences,2005. (in Chinese)

[2] 张丽,汤恩生,许敬旺. 空间相机像移补偿方法研究[J]. 航天返回与遥感,2007,28(3):19-22.
ZHANG L,TANG E SH,XU J W. Study on the image motion compensation methods of space camera[J]. *Returns and Remote Sensing Space*,2007,28(3):19-22. (in Chinese)

[3] 张玉欣,刘宇,葛文奇. 像移补偿技术的发展与展望[J]. 中国光学与应用光学,2010,3(2):112-118.
ZHANG Y X,LIU Y,GE W Q. Development and prospect of image motion compensation technology[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*,2010,3(2):112-118. (in Chinese)

[4] 王德江,匡海鹏,蔡希昌. TDI-CCD 全景航空相机前向像移补偿的数字实现方法[J]. 光学 精密工程,2008,16(12):2465-2471. (in Chinese)
WANG D J,KUANG H P,CAI X CH. Digital implement of forward motion compensation in TDI-CCD panoramic aerial camera[J]. *Opt. Precision Eng.*,2008,16(12):2465-2471.

[5] LIU M,LIU G,XIU J H,*et al.*. Aerial image blurring caused by image motion and its restoration using wavelet transform [J]. *Electronic Imaging and Multimedia Technology IV*,*SPIE*,5637:425-433.

[6] 刘立国,丁亚林,赵运隆,等. 增加航空摄影地面收容宽度方法研究[J]. 液晶与显示,2012,27(2):223-228.
LIU L G,DING Y L,ZHAO Y L,*et al.*. Method of improving coverage width of aerial camera[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*,2012,27(2):223-228. (in Chinese)

[7] 黄浦,葛文奇,李友一,等. 航空相机前向像移补偿的线性自抗扰控制[J]. 光学 精密工程,2011,19(4):812-818.
HUANG P,GE W Q,LI Y Y,*et al.*. Linear auto disturbance rejection control of forward image motion compensation in aerial cameras[J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(4):812-818. (in Chinese)

[8] 李延伟,远国勤. 面阵彩色航空遥感相机前向像移补偿机构精度分析[J]. 光学 精密工程,2012,20(11):2439-2443.
LI Y W,YUAN G Q. Accuracy analysis of forward image displacement compensation device for aerial scan color CCD camera[J]. *Opt. Precision Eng.*,2012,20(11):2439-2443. (in Chinese)

[9] 孙辉. 相位相关技术实现离焦模糊图像运动估计[J]. 液晶与显示,2012,27(2):223-228.
SUN H. Estimation of displacement for out-of-focus blurred image using phase-only correlation[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*,2012,27(2):223-228. (in Chinese)

[10] 刘明,刘钢,李友一,等.航空相机的像移计算及其像移分析[J].光电工程,2004,31(增刊):12-14.
LIU M,LIU G,LI Y Y,*et al*.. The effect of image motion on the quality of aerial camera images[J]. *Opto-Electronic Eng*.,2004,31(Suppl.):12-14(in Chinese).

[11] 李弼程,彭天强,彭波.智能图像处理技术[M].北京:电子工业出版社,2004.
LI B CH,PENG T Q,PENG B. *Intelligent Image Processing Technology*[M]. Beijing:Electronics Industry Press,2004 (in Chinese)

[12] 李庆波,许志高,陈守谦,等.探测器噪声对波前编码成像系统图像复原过程影响的理论研究[J].光学与光电技术,2011,9(6):14-20.
LI Q B,XU ZH G,CHEN SH Q,*et al*.. Detector noise in the wavefront coding imaging system recovery process[J]. *Opt. Optoelectronic Technology*,2011,9(6):14-20.(in Chinese)

[13] BANHAM M R,KATSAGGELOS A K. Digital image restoration[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*,1997,14(2):24-41.

[14] 阮秋琦等译.数字图像处理[M].北京:电子工业出版社,2009.
RUAN Q Q,M. *Digital Image Processing*[M]. Beijing:Electronics Industry Press,2009.(in Chinese)

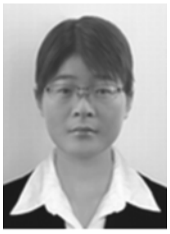
[15] 贾平,张葆,孙辉.航空成像像移模糊恢复技术[J].光学 精密工程,2006,14(4):698-703.
JIA P,ZHANG B,SUN H. Restoration of motion-Blurred aerial image[J]. *Opt. Precision Eng*.,2006,14(4):698-703.(in Chinese)

[16] 邓泽峰.图像复原技术研究及应用[D].武汉:华中科技大学,2007.
DENG Z F. Research and application of image restoration[D]. WU Han: Huazhong University of Science and Technology,2007.(in Chinese)

[17] YITZHAKY Y,KOPEIKA N S. Identification of blur parameters from motion blurred images[J]. *SPIE*,1996,2847:270-280.

[18] 贺卫国,黎绍发.运动模糊图像的噪声功率的精确估计[J].计算机工程与应用,2005,8:23-25.
HE W G,LI SH F. Estimate of the noise power of uniform linear motion blurred images[J]. *Computer Eng. Appl*.,2005,8:23-25.(in Chinese)

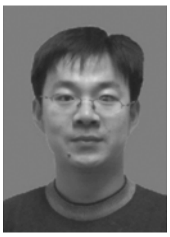
作者简介:



曹海霞(1986—),女,山东聊城人,博士研究生,2009年于聊城大学获得学士学位,主要从事光栅检验及光谱仪器研发方面的研究。E-mail: caohaixia132@163.com

崔继承(1976—),男,吉林长春人,副研究员,博士研究生,2000年于北京理工大学获得学士学位,2003年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光学设计、光谱仪器设计开发、光谱理论研究。E-mail: jicheng_cui@yahoo.com.cn

巴音贺希格(1962—),男,内蒙古鄂尔多斯人,博士,研究员,博士生导师,1984年于内蒙古民族大学获得学士学位,2001年于吉林大学获得硕士学位,2004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,主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术研究。E-mail:bayin888@sina.com



张永超(1986—),男,山东淄博人,博士研究生,2009年于烟台大学获得学士学位,主要从事空间短波光学技术方面的研究。E-mail:zyc09optics@sina.com