

文章编号 1004-924X(2013)02-0514-08

湍流退化红外图像降晰函数辨识

张士杰^{1*}, 李俊山¹, 杨亚威^{1,2}, 张仲敏^{1,3}

(1. 第二炮兵工程大学 信息工程系, 陕西 西安 710025;

2. 96215 部队, 广西 柳州 545616; 3. 西安通信学院, 陕西 西安 710106)

摘要:针对高速湍流场导致的红外成像模糊,提出了一种基于图像质量评价的湍流退化红外图像降晰函数辨识算法。利用先验知识将退化过程简化为可用参数描述的二维高斯函数形式,将退化图像分割为边缘区、纹理区和平坦区,计算不同支持域下复原图像在不同参数时的峰度值;利用曲率最大准则对得到的“峰度-参数”曲线进行相应的降晰函数参数估计,进而由支持域和对应的估计参数得到对应降晰函数并用于复原退化图像;最后对复原图像进行无参考图像质量评价,评价指标最高的复原图像对应的降晰函数即为最终辨识结果。实验结果表明:该算法能较好地辨识降晰函数参数和支持域大小,当退化图像信噪比大于 30 dB 时,估计参数与真实值的最大偏差小于±5%。该算法所得结果可以作为湍流退化红外图像其他复原算法的降晰函数起始估计。

关键词:气动光学效应;湍流退化;红外图像;图像质量评价;降晰函数辨识

中图分类号:TP391.4;TN219 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132102.0514

Blur identification of turbulence-degraded IR images

ZHANG Shi-jie^{1*}, LI Jun-shan¹, YANG Ya-wei^{1,2}, ZHANG Zhong-min^{1,3}

(1. Department of Information Engineering, the Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;
2. 96215 Unit of PLA, Liuzhou 545616, China; 3. Xi'an Communications Institute, Xi'an 710106, China)

* Corresponding author, E-mail: bei_ming_you_yu@sina.com

Abstract: A novel algorithm based on image quality assessment was proposed for a turbulence-degraded infrared image to deblur the fuzzy infrared image caused by a high-speed turbulent flow field. Firstly, the degradation process was simplified as parameter-describing 2-D Gaussian function according to the prior knowledge, the degraded image was segmented into edge region, texture region and plain region and the weighted average of those regional 2-D kurtosis were used as the image kurtosis. Then, the kurtosis of restored image varying with the parameter under different support regions was calculated and the curvature-maximum criterion was used to estimate the corresponding parameter from the “kurtosis-parameter” curve. After that, the Point Spread Function (PSF) determined by the support domain and corresponding estimated parameter were used to restore the degraded image. Finally, a no-reference image quality assessment was used to compare different restored images, and the PSF of the recovered image with the highest quality was regarded as a final identification result. Experimental

收稿日期:2012-12-11;修订日期:2013-01-06.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61075025, No. 61175120)

results show that the proposed algorithm can identify the parameter and support region of the blur function well, and the maximum deviation of the estimated parameter and the real value is less than $\pm 5\%$ when the Signal to Noise Ratio(SNR) of the degraded image is larger than 30 dB. The identification results can be used as an initial PSF estimation for other turbulence-degraded infrared image restoration algorithms.

Key words: aero-optical effect; turbulence degradation; infrared image; image quality assessment; blur identification

1 引言

当导弹在大气层内以超声速/高超声速飞行时,导引头与大气之间发生剧烈相互作用形成复杂的高温湍流场,产生气动光学效应^[1-2],这会对光学成像探测系统造成热辐射干扰和图像传输干扰。这些干扰使光学系统接收到的目标图像产生偏移、抖动、模糊等,从而严重影响了导引头探测、识别和跟踪目标的能力,降低了导弹命中目标的精度,严重时甚至无法检测识别目标。因此,从湍流退化图像中有效地复原出原目标图像,是实现超声速/高超声速巡航导弹成像探测及精确制导与寻的必须解决的关键问题之一。

目前对湍流退化图像的复原多采用迭代盲目反卷积算法^[3-4],其图像和降晰函数的高维非奇异性导致算法耗时较长,难以满足快速复原校正的要求,而为提高复原效果增加的正则化项^[5-7]也进一步增加了算法复杂度。近年来,出现了一些基于湍流物理知识和退化图像信息的快速复原算法。肖利平等^[8]提出了一种基于飞行参数估计点扩展函数大小的湍流退化图像快速复原算法,由于算法中点扩展函数大小和飞行参数之间的关系还需要通过大量的实验来确定,限制了该方法的应用。Shacham等^[9]提出通过退化图像中的最佳阶跃边缘估计出线扩展函数,并以此作为湍流降晰函数的最佳近似来复原退化图像,但对于湍流退化红外图像,最佳阶跃边缘很难获取。赵剡等^[10]提出了基于误差-参数分析法的气动光学效应降晰函数辨识和复原算法,将气动光学效应引起的图像退化假设为高斯模糊,以复原误差作为准则,得到误差-参数曲线并从该曲线的变化中判别出参数;但是,误差-参数曲线是单调变化的,基于极小化误差度量的方法难以获得准确参数。邹谋炎^[11]在误差度量中增加了规整化项,但也无助

于高斯降晰函数参数的准确判定。因此,准确判定高斯降晰函数的参数需要重新寻找一个新的准则。

本文针对高速湍流造成的红外成像模糊,提出了一种基于图像质量评价的湍流退化红外图像降晰函数辨识方法。首先利用先验知识将湍流退化过程简化为可用参数描述的二维高斯函数形式;其次利用二维峰度(kurtosis)作为测量准则,得到降晰函数支持域和参数的一组估计,进而由估计支持域和参数确定降晰函数并用于复原退化图像;最后对多个复原图像进行无参考图像质量评价,评价指标最高的复原图像对应的降晰函数就是最终辨识结果。

2 降晰函数辨识

2.1 图像退化模型

设 $f(x, y)$ 是一幅原图像,图像的退化过程^[12]可以理解为一个作用于原图像 $f(x, y)$ 的运算 H ;同时数字图像也常会因一些随机噪声而退化;也就是说,图像的退化常常是运算 H 和噪声的联合作用。图像的退化模型如图1所示。

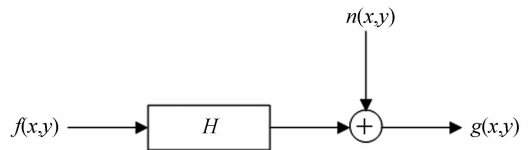


图1 图像退化模型

Fig. 1 Model of image degradation

并可以表示为:

$$g(x, y) = H[f(x, y)] + n(x, y). \quad (1)$$

将 $H[f(x, y)]$ 简化并写成卷积形式,式(1)变为:

$$g = h * f + n, \quad (2)$$

其中: g 是退化(观测)图像, f 是原始图像, h 是降

晰函数(点扩展函数), n 是加性噪声。* 表示卷积运算。

如果已知气动光学效应的降晰函数, 气动光学效应退化图像的复原将变为一个滤波问题。

2.2 湍流退化模型与高斯函数

湍流场的精确密度分布通常难以获得, 因此 Sutton^[13] 将气动光学效应的计算分为平均流场和脉动流场两部分。平均流场产生视线误差和模糊, 通过物理光学方法计算得到; 脉动流场产生抖动、散射和模糊, 通过统计光学方法计算得到。

本文研究的湍流退化是指湍流造成的像模糊, 它由平均流场和脉动流场的高频分量产生。成像探测系统图像模糊的程度还与探测器的积分时间有关, 在一定的范围内积分时间越长, 抖动造成的图像模糊越严重。

流场中的湍流规模比波长大, 比系统孔径小时, 像模糊可以用点扩展函数(降晰函数)表示。Banish^[14] 利用 AOQ 代码研究了不同入射波长下的气动光学效应降晰函数, 指出当入射光线的波长远小于成像系统口径时, 点扩展函数为湍流相关的 Gauss 函数^[11] 分布形式。赵剡等^[10] 也假设湍流引起的像模糊作用过程具有高斯随机的特性, 取像模糊的降晰函数为高斯函数形式。

降晰函数的 Gauss 函数形式可以表示如下:

$$h(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{c} \exp(-\alpha((i-i_0)^2 + (j-j_0)^2)), & (i, j) \in D_h \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: D_h 是降晰函数的支持域, (i_0, j_0) 是 D_h 的中心点; c 是归一化系数, 使得 $\sum h(i, j) = 1$ 。支持域 D_h 和参数 α 共同表征了这个 Gauss 函数; 因此, 降晰函数的辨识就是确定支持域 D_h 和参数 α 。

3 基于图像质量评价的降晰函数辨识

3.1 图像质量评价准则

用于参数辨识的图像质量评价准则^[15-16] 应该满足: ①无参考, 不依赖原始图像信息, 这是因为湍流退化图像的原始图像在实际中是难以获得的; ②具有较快的运算速度, 由于估计过程中需要进行很多次迭代, 如果评价指标的运算需要太多的时间就会增加整个辨识过程的时间消耗; ③得

到的“质量评价-参数”曲线, 应易于实现参数的自动判读, 方便后续处理。

Li 等^[17] 在对自然图像的研究中发现, 图像的峰度值会随着图像模糊程度的增大而增大。Caviedes 等^[18] 认为清晰边缘点上的 DCT 系数除直流量外应满足高斯分布, 可以利用峰度与高斯分布之间的相似性来估计图像的模糊程度。因此, 峰度可用作无参考图像质量评价指标。本文以图像的二维峰度值作为测量准则, 用于降晰函数参数的辨识。

3.2 二维峰度计算

峰度用于衡量随机变量概率分布的峰态, 一维随机变量 x 的峰度定义如下:

$$K = \frac{E((x-\mu)^4)}{\sigma^4}, \quad (4)$$

式中: μ 为变量的均值, σ 为变量的标准差。峰度高就意味着方差增大是由低频度的大于或小于平均值的极端差值引起的。

对于存在 4 阶矩的 p 维随机矢量 $\mathbf{W} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_p]$, 假设 $\boldsymbol{\mu}$ 和 $\boldsymbol{\Gamma}$ 分别是它的均值矢量和协方差矩阵, p 维随机矢量 \mathbf{W} 的峰度计算公式^[19] 为:

$$\mathbf{K}_p = E[(\mathbf{W}-\boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Gamma}^{-1} (\mathbf{W}-\boldsymbol{\mu})]. \quad (5)$$

Zhang 等^[20] 基于式(5)推导了二维变量的峰度计算公式:

$$K_2 = [\gamma_{4,0} + \gamma_{4,4} + 2\gamma_{2,2} + 4\rho(\rho\gamma_{2,2} - \gamma_{1,3} - \gamma_{3,1})] / (1-\rho^2)^2, \quad (6)$$

其中:

$$\gamma_{k,l} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_i - \mu_x)^k (y_j - \mu_y)^l p(x_i, y_j)}{\left(\sum_{i=1}^m (x_i - \mu_x)^2 p(x_i)\right)^{k/2} \left(\sum_{j=1}^n (y_j - \mu_y)^2 p(y_j)\right)^{l/2}}, \quad (7)$$

$$\sigma_{xy}^2 = E[(X - \mu_x)(Y - \mu_y)], \quad (8)$$

$$\rho = \sigma_{xy}^2 / [\sigma_x \sigma_y]. \quad (9)$$

式(7)中概率密度函数 $p(x, y)$ 使用文献^[18] 的方法得到, 即使用 8×8 图像块的 DCT 系数矩阵 $\mathbf{D}(u, v)$ (排除 $D(0, 0)$), 用其归一化功率谱来得到二元密度函数 $p(x, y)$, 其中 $\sum p(x, y) = 1$ 。为了提高二维峰度的计算效率, 可以使用文献^[21] 的加速算法。

本文首先利用局部方差^[22] 将退化图像分割^[23] 为边缘区、平坦区和纹理区, 以各区域的平

均峰度值作为该区域的峰度值。由于在相同的模糊条件下不同区域峰度值是不尽相同的,因此使用各区域峰度加权平均值作为整幅图像的峰度值,即:

$$K = \beta_1 K_E + \beta_2 K_T + \beta_3 K_P, \quad (10)$$

其中: K_E 、 K_T 、 K_P 分别是边缘区、纹理区和平坦区的峰度值, β_1 、 β_2 、 β_3 为对应的加权系数, $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1$ 。在人眼感知领域^[15],边缘区的重要程度最高,纹理区次之,平坦区最低,因此,加权系数的选择应满足 $\beta_1 > \beta_2 > \beta_3$,图像各区域权重的取值目前尚无严格标准^[24],实验中取值设定为 $\beta_1 : \beta_2 : \beta_3 = 5 : 3 : 2$ 。

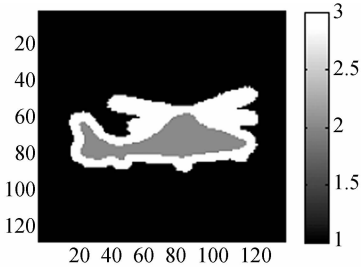
3.3 降晰函数辨识算法

对于由不同支持域 D_i 和参数 α 表征的多个降晰函数 h ,使用基于循环边界的 Wiener 滤波复原算法^[11]得到相应的复原图像,分别计算这些复原图像的二维峰度值,从而得到不同支持域的 $K-\alpha$ 曲线。

在可见光图像中,可以利用峰度曲线的极值来判定参数,但在红外图像(如图 2)的实验中发
发现,真实参数值并不总出现在峰度最小^[17]或最大^[18]时,而是常常出现在峰度曲线弯曲(曲率)最



(a)原始红外图像 (b)退化图像
(a) Original IR image (b) Degraded image of (a)



(c)退化图像分割结果
(c) Segmentation of (b)

图 2 实验图像

Fig. 2 Images for experiment

大处,如图 3 所示;另一方面,在相同参数变化范围内,真实支持域对应的 $K-\alpha$ 曲线并没有表现出一定的规律性;通过直接观察不同支持域的 $K-\alpha$ 曲线来判定真实支持域的大小是很困难的,如图 4 所示。

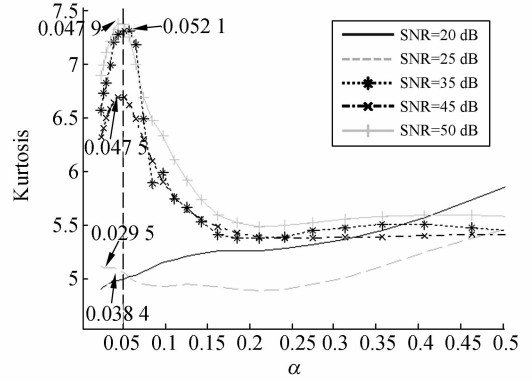
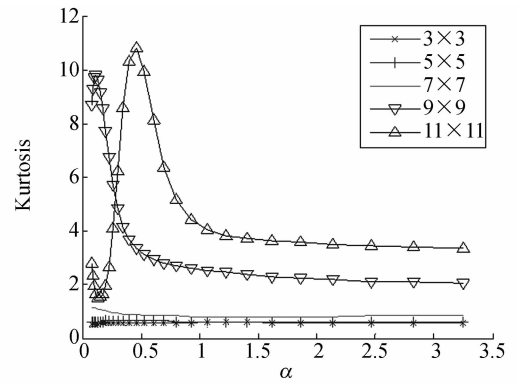
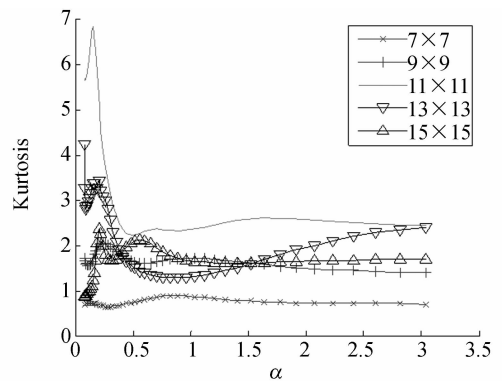


图 3 不同信噪比条件下峰度-参数曲线
Fig. 3 $K-\alpha$ curves at different SNRs



(a)第一组实验的峰度-参数曲线
(a) $K-\alpha$ curves in experiment I



(b)第二组实验的峰度-参数曲线
(b) $K-\alpha$ curves in experiment II

图 4 不同支持域下的峰度曲线

Fig. 4 $K-\alpha$ curves in different support regions

本文提出了基于无参考图像质量评价的支持域 D_h 和参数 α 组合的判定方法。即分别计算得到不同支持域下复原图像 K - α 曲线并利用曲率最大准则得到不同的参数估计;使用基于图像各向异性的无参考图像质量评价方法^[25]对不同降晰函数估计(由支持域 D_h 和参数 α 确定)复原得到的图像进行评价,评价指标最高的复原图像对应的降晰函数就是最终辨识结果。

详细步骤如下:

(1)对退化图像 g 进行区域分割,将图像划分为边缘区、纹理区和平坦区;

(2)对给定的支持域 $D_{h,i} \in [D_{\min}, D_{\max}]$,分别计算参数 α 在 $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$ 变化时复原图像的峰度值;

(3)计算每条 K - α 曲线曲率最大处对应的 $\hat{\alpha}$,从而得到不同支持域 $D_{h,i}$ 对应的 $\hat{\alpha}_i$;

(4)根据支持域 $D_{h,i}$ 和 $\hat{\alpha}_i$ 利用式(3)计算 h_i ,使用 Wiener 滤波算法得到对应的复原图像 \hat{x}_i ;

(5)使用无参考图像质量评价方法计算复原图像 \hat{x}_i 的评价指标值;

(6)评价指标值最高 \hat{x}_i 的对应 h_i 就是最终辨识出的降晰函数。

由于退化图像复原的病态性,噪声的存在是对图像复原的重要限制;当退化图像信噪比较低时,复原图像的峰度特征与降晰函数参数之间的关系会受到噪声的影响,并降低降晰函数参数判定的准确性。

4 实验与数据分析

为了验证本文算法的有效性,对不同模糊条件下的湍流退化图像在 MATLAB R2008a 环境下做了仿真实验。

图 2 给出了仿真实验原始图像和实验条件为 $D_h = 9 \times 9, \alpha = 0.05$ 下模糊图像及模糊图像的区域分割结果。

本文以图 2 为例研究了不同信噪比对降晰函数参数辨识的影响,实验中假定降晰函数支持域已知。图 3 是不同信噪比条件下的复原图像峰度随参数的变化曲线,表 1 是对应的降晰函数参数

的辨识结果。

表 1 图 3 辨识出的降晰函数参数

Tab. 1 Blur identification results of Fig. 3

SNR(dB)	α	Relative error (%)
20	0.038 4	-23.2
25	0.029 5	-41.0
35	0.052 1	+4.2
45	0.047 5	-5.0
50	0.047 9	-4.2

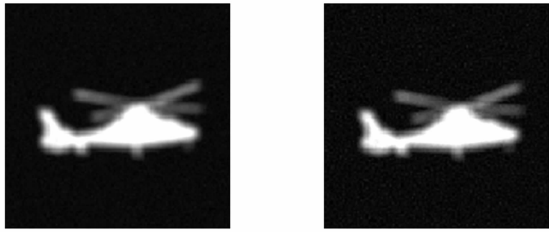
从图 3 和表 1 中可以看出,当退化图像信噪比较高时($\text{SNR} > 25$ dB),辨识出来的参数在真实值附近;而当信噪比较低时($\text{SNR} \leq 25$ dB),辨识出来的参数与真实值差别较大。因此,本算法更适用于退化图像信噪比较高的情况。

对于不同降晰函数支持域和参数条件下的情况,本文分别做了两组实验,结果如图 4~8 所示。第一组实验基于背景较为简单的图 2,模糊条件是 $D_h = 7 \times 7, \alpha = 0.86, \text{SNR} = 30$ dB;第二组实验使用了背景较为复杂,前景目标相对较小的红外图像,模糊条件为 $D_h = 11 \times 11, \alpha = 0.15, \text{SNR} = 35$ dB。

图 4 给出了不同支持域条件下,复原图像峰度值随参数 α 的变化曲线。图 4(a)是第一组实验所得曲线,真实支持域为 7×7 ;图 4(b)是第二组实验所得曲线,真实支持域为 11×11 。从图中可以看出,在相同参数变化范围内,真实支持域对应的 K - α 曲线并没有表现出一定的规律性;因此通过直接观察不同支持域的曲线来判定真实支持域的大小是很困难的。

图 5 和图 7 是两组实验中使用不同降晰函数(由支持域 D_h 和参数 α 确定)复原得到图像。对这些复原图像使用基于各向异性的无参考图像质量评价方法评价,评价指标曲线如图 6 和图 8,该评价指标的数值越大图像质量越好。从图 6 和图 8 中可以看出,评价指标最高的复原图像对应的降晰函数支持域和参数分别是 $D_h = 7 \times 7, \alpha = 0.086 2$ 和 $D_h = 11 \times 11, \alpha = 0.146 9$ 。

由实验结果可以看出,当退化图像信噪比大于 30 dB 时,本文算法辨识出的结果非常接近真



(a) Degraded image
($\alpha: 0.086\ 0, D_h: 7 \times 7$)

(b) Restored image 1
($\alpha: 1.067\ 0, D_h: 3 \times 3$)



(c) Restored image 2
($\alpha: 0.263\ 9, D_h: 5 \times 5$)

(d) Restored image 3
($\alpha: 0.086\ 2, D_h: 7 \times 7$)



(e) Restored image 4
($\alpha: 0.110\ 7, D_h: 9 \times 9$)

(f) Restored image 5
($\alpha: 0.130\ 3, D_h: 11 \times 11$)

图 5 第一组实验复原图像

Fig. 5 Restored images in experiment I

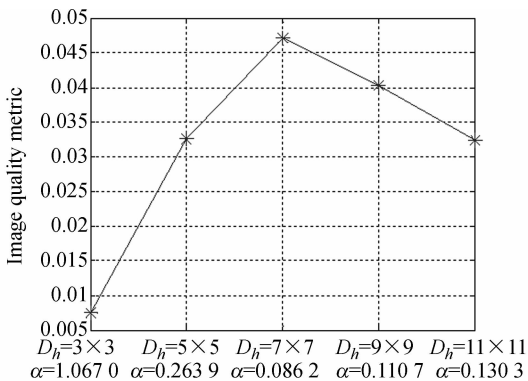


图 6 第一组实验复原图像的质量指标

Fig. 6 Quality metric of restored images in experiment I



(a) Degraded image
($\alpha: 0.150\ 0, D_h: 11 \times 11$)



(b) Restored image 1
($\alpha: 0.139\ 8, D_h: 7 \times 7$)



(c) Restored image 2
($\alpha: 0.108\ 7, D_h: 9 \times 9$)



(d) Restored image 3
($\alpha: 0.146\ 9, D_h: 11 \times 11$)



(e) Restored image 4
($\alpha: 0.094\ 2, D_h: 13 \times 13$)



(f) Restored image 5
($\alpha: 0.210\ 0, D_h: 15 \times 15$)

图 7 第二组实验复原图像

Fig. 7 Restored images in experiment II

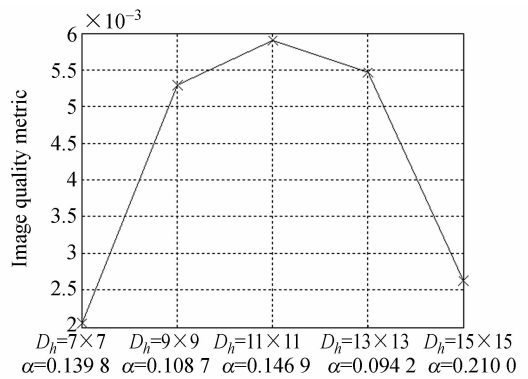


图 8 第二组实验复原图像的质量指标

Fig. 8 Quality metric of restored images in experiment II

5 结 论

本文针对高速湍流场导致的红外成像模糊, 基于先验知识, 将湍流退化过程简化为二维高斯函数形式, 提出了一种基于图像质量评价的湍流

实值; 参数的估计值与真实值的最大偏差小于士 5%。

退化红外图像降晰函数辨识算法。实验结果表明:该算法能较好地辨识降晰函数参数和支持域,当退化图像的信噪比大于 30 dB 时,辨识参数与

真实值的最大偏差小于±5%。该算法无需人工参与,能自动判读参数;辨识结果可为其他湍流退化红外图像复原算法提供降晰函数起始估计。

参考文献:

- [1] 殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京:中国宇航出版社,2003.
YIN X L. *Principle of Aero-Optics*[M]. Beijing: China Astronautics Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 许东,段玥,陈科杰. 基于风洞测试试验图像的湍流场光传输效应统计特性分析[J]. 航空兵器,2011(6):54-58.
XU D, DUAN Y, CHEN K J. Analysis of the statistical properties of transmission effects in turbulence based on the wind tunnel test images [J]. *Aero Weaponry*, 2011(6):54-58. (in Chinese)
- [3] 李勇,范承玉,时东锋,等. 基于加速阻尼 Richardson-Lucy 算法的湍流退化图像盲复原方法[J]. 激光与光电子学进展,2011,48(8):104-111.
LI Y, FAN CH Y, SHI D F, *et al.*. Turbulence-degraded image blind restoration method using accelerated and damped Richardson-Lucy algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48 (8): 104-111. (in Chinese)
- [4] 黄德天,吴志勇. 基于非负支撑域受限递归滤波的自适应图像盲复原[J]. 光学 精密工程,2012,20(9):2078-2086.
HUANG D T, WU ZH Y. Adaptive blind image restoration based on NAS-RIF algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9):2078-2086. (in Chinese)
- [5] 李勇,范承玉,时东锋. 基于加速正则化 RL 算法的大气湍流退化图像盲复原方法[J]. 大气与环境光学学报,2011,6(5):342-350.
LI Y, FAN CH Y, SHI D F. Atmospheric turbulence-degraded image blind restoration method using the accelerated and regularized RL algorithm [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2011,6(5):342-350. (in Chinese)
- [6] 张红民,成于思. 一种改进的总变分正则化图像盲复原方法[J]. 激光杂志,2012,33(3):27-28.
ZHANG H M, CHENG Y S. A modified method for total variational regularization blind image restoration [J]. *Laser Journal*, 2012,33(3):27-28. (in Chinese)
- [7] HONG H Y, LI L C, ZHANG T X. Blind restoration of real turbulence-degraded image with complicated backgrounds using anisotropic regularization [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(24): 4977 - 4986.
- [8] 肖利平,陈安宏,曹炬,等. 基于飞行参数约束的湍流退化图像快速复原算法[J]. 红外与激光工程,2008,37(3):538-541,560.
XIAO L P, CHEN A H, CAO J, *et al.*. Fast restoration algorithm based on constraint of flight parameters for the turbulence-degraded images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (3): 538-541,560. (in Chinese)
- [9] SHACHAM O, HAIK O, YITZHAKY Y. Blind restoration of atmospherically degraded images by automatic best step-edge detection [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2007, 28: 2094-2103.
- [10] 赵剡,宗云花,张世军,等. 气动光学效应降晰函数辨识与图像复原[J]. 兵工学报,2005,26(2):188-191.
ZHAO Y, ZONG Y H, ZHANG SH J, *et al.*. Identification of blurs for aero-optics effect coordinate measuring machine [J]. *Acta Armamentarii*, 2005,26(2):188-191. (in Chinese)
- [11] 邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 北京:国防工业出版社,2001.
ZOU M Y. *Deconvolution and Signal Recovery* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [12] 李俊山,李旭辉. 数字图像处理[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
LI J S, LI X H. *Digital Image Processing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. (in Chinese)
- [13] SUTTON G W, POND J E, SNOW R, *et al.*. Hypersonic interceptor aero-optics performance predictions [J]. *Journal of Space and Rockets*, 1994, 31(4): 592-599.
- [14] BANISH M R. A validated code to predict the performance of broadband optical seekers through a turbulent transonic flow [R]. 1992. AIAA-92-2792.
- [15] 高新波,路文. 视觉信息质量评价方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2011.

- GAO X B, LU W. *Quality Assessment Methods for Visual Information* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2011. (in Chinese)
- [16] 范媛媛,沈湘衡,桑英军. 基于对比度敏感度的无参考图像清晰度评价[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2485-2493.
FAN Y Y, SHEN X H, SANG Y J. No reference image sharpness assessment based on contrast sensitivity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2485-2493. (in Chinese)
- [17] LI D L, SIMSKE S. Atmospheric turbulence degraded-image restoration by kurtosis minimization [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(2): 244-247.
- [18] CAVIEDES J, OBERTI F. A new sharpness metric based on local kurtosis, edge and energy information [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2004, 9: 147-161.
- [19] MARDIA K V. Measures of multivariate skewness and kurtosis with applications [J]. *Biometrika*, 1970, 57: 519-530.
- [20] ZHANG N F, POSTEK M T, LARRABEE R D, et al.. Image sharpness measurement in scanning electron microscope -Part III [J]. *Scanning*, 1999, 21: 246-252.
- [21] RONY F, LAKSHMI G, WALID S I A. Efficient implementation of kurtosis based on reference image sharpness metric [C]. *Proc. SPIE 7532, Image Processing: Algorithms and Systems VIII, San Jose, CA: SPIE-IS&T*, 2010: 1-12.
- [22] 王宇庆. 局部方差在图像质量评价中的应用[J]. *中国光学*, 2011, 4(5): 531-536.
WANG Y Q. Application of local variance in image quality assessment [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(5): 531-536. (in Chinese)
- [23] 王斌,李浩,高新波. 一种基于边缘与区域信息的先验水平集图像分割方法[J]. *计算机学报*, 2012, 35(5): 1067-1072.
WANG B, LI J, GAO X B. A edge-and region-based level set method with shape priors for image segmentation [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2012, 35(5): 1067-1072. (in Chinese)
- [24] LI J L, CHEN G, CHI Z R, et al.. Image coding quality assessment using fuzzy integrals with a three-component image model [J]. *IEEE Trans. on Fuzzy System*, 2004, 1(12): 99-106.
- [25] GABARDA S, CRISTOAL G. Blind image quality assessment through anisotropy [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2007, 24(12): B42-B51.

作者简介:



张士杰(1981—),男,河南永城人,博士研究生,工程师,2003年于中国矿业大学获得学士学位,2006年于解放军信息工程大学获得硕士学位,主要从事气动光学退化效应仿真及退化图像复原方面的研究。E-mail: bei_ming_you_yu@sina.com.cn



李俊山(1956—),男,陕西白水人,教授,博士生导师,1981于国防科技大学获得学士学位,1988年于第二炮兵工程学院获得硕士学位,2001年于西安微电子技术研究所获得博士学位,主要从事智能图像处理与目标感知识别、网络信息安全、电子对抗模拟与仿真等方面的研究。E-mail: lijunshan403@163.com



杨亚威(1986—),男,河南民权人,博士研究生,2008年、2010年分别于第二炮兵工程大学分别获得学士、硕士学位,主要从事红外图像处理、图像复原和目标识别及跟踪等方面的研究。E-mail: 13484468703@163.com



张仲敏(1979—),男,山西忻州人,博士研究生,讲师,2001年于解放军信息工程大学获得学士学位,2007年于西北工业大学获得硕士学位,主要从事图像处理和装备保障决策等方面的研究。E-mail: zon_8986@163.com