

湍流退化红外图像校正算法

张士杰¹, 李俊山¹, 杨亚威^{1,2}, 张 姣¹, 李海龙¹, 郭 毅³

- (1. 第二炮兵工程大学 信息工程系, 陕西 西安 710025;
2. 中国人民解放军第 96215 部队, 广西 柳州 545616;
3. 第二炮兵工程大学 1112 分队, 陕西 西安 710025)

摘 要: 针对高速湍流场引起的红外图像模糊问题, 提出了一种基于改进增量 Wiener 滤波的复原校正算法。首先, 基于先验知识对湍流退化图像的降晰函数进行辨识并得到复原图像的起始估计; 其次, 提取起始复原图像中的强边缘并平滑边缘区域; 最后, 利用改进的增量维纳滤波算法迭代复原图像。实验结果表明: 该算法与传统的迭代盲复原算法及基于 Fuzzy 滤波器的后期去振铃算法相比, 复原图像的振铃测度有较大下降, 同时提高了复原图像的质量, 降低了算法的时间复杂度。

关键词: 气动光学效应; 湍流退化; 红外图像; 振铃效应; 边缘平滑; 增量 Wiener 滤波
中图分类号: V211; TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3670-06

IR image correction algorithm for turbulence-degraded

Zhang Shijie¹, Li Junshan¹, Yang Yawei^{1,2}, Zhang Jiao¹, Li Hailong¹, Guo Yi³

- (1. Department of Information Engineering, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;
2. Unit 96215 of PLA, Liuzhou 545616, China; 3. Element 1112, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to deblur the fuzzy infrared image caused by high-speed turbulent flow field, a novel correction algorithm based on the modified incremental Wiener filter was proposed. Firstly, the degradation process was simplified as parameter-describing 2-D Gaussian function according to the prior knowledge, and the Point Spread Function (PSF) was estimated via an image quality assessment based blur identifier, which also can provide the initial restored image estimation. Then, strong edges in the initial restored image were detected and their corresponding area was smoothed to get the Edge Smoothed (ES) initial restored image. Finally, the ES image was restored through the modified incremental Wiener filter using the estimated PSF. Experimental results show that this algorithm can effectively suppress ringing artifacts, reduce the ringing metric of the restored image compared with those of the traditional iterative restoration algorithm and the Fuzzy filter based algorithm, and better the recovery image quality evidently, significantly reduce the time complexity.

Key words: aero-optical effects; turbulence-degradation; IR image; ringing effects; smoothed edge; incremental Wiener filter

收稿日期: 2014-03-05; 修订日期: 2014-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(61075025, 1175120)

作者简介: 张士杰(1981-), 男, 工程师, 博士生, 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。

Email: bei_ming_you_yu@sina.com.cn

导师简介: 李俊山(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 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。Email: lijunshan403@163.com

0 引言

红外成像系统具有灵敏度高、抗干扰能力强、可实现复杂战场环境下全天时工作等优良特性。红外成像精确制导已经成为我国重点研究的技术之一。然而,导弹在大气层内以超声速/高超声速飞行时产生的气动光学效应^[1-3]对光学成像探测系统造成热辐射干扰和图像传输干扰,导致光学系统接收到的目标图像产生偏移、抖动、模糊等,大大影响了导引头探测、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,如何从湍流退化图像中有效地复原出目标图像,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。

目前对湍流退化模糊图像的复原多采用迭代盲复原算法。如付长军等提出的基于最大熵盲复原方法^[4],Hong 等人提出的基于各向异性规整化的湍流退化图像盲复原算法^[5]。由于盲复原算法中点扩展函数未知,如果估计的点扩展函数尺寸小于实际值会使复原结果出现模糊,达不到复原的目的;如果估计点扩展函数大于实际值则会使复原结果出现严重的振铃。针对这一问题,肖利平等^[6]推导了图像退化点扩展函数大小与飞行参数之间的关系,但关键系数仍需要通过大量风洞实验获得,限制了该方法的使用。另一方面,为了提高盲复原算法的效率,一些学者也提出了各种快速算法,如洪汉玉等人提出的基于线性搜索的红外目标图像循环迭代复原加速算法^[7],邵慧等人提出的基于 Huber 正则化二阶加速复原算法^[8],Deshmukh 等提出的基于分层块的快速降低湍流退化算法^[9]。但是,为了得到较好的复原图像质量,盲复原算法仍需要较多的迭代次数,难以满足实时性的应用需求^[10]。

湍流退化图像复原校正方法的研究不能仅集中在算法本身,还需要考虑到退化过程中的一些先验知识。肖利平等^[6]建立退化图像降晰函数尺寸与飞行参数之间的关系是一个很好的尝试。文中以气动光学效应的研究成果作为先验知识,将湍流引起的图像模糊过程简化为可用参数描述的二维高斯函数形式;并利用基于图像质量评价的降晰函数辨识方法估计出降晰函数和复原图像起始值;最后使用

改进的增量 Wiener 滤波器进行迭代复原。

1 图像退化模型与增量 Wiener 滤波器

1.1 图像退化模型

气动光学效应的已有研究成果^[11-12]表明:当流场中的湍流规模比波长长,比系统孔径小时,湍流引起的像模糊效应可以用降晰函数表示,图像的退化可近似为空间不变模糊。此时,湍流退化过程可视为线性空不变模糊,图像退化模型的可表示为:

$$g = h * f + n \quad (1)$$

式中: g 为退化(观测)图像; f 为原始图像; h 为降晰函数; n 为加性噪声; $*$ 为卷积运算。

变换到频率域,公式(1)变为:

$$G(\omega) = H(\omega)F(\omega) + N(\omega) \quad (2)$$

图像复原就是由退化图像 g 求解原始图像 f 。如果 h 未知,则属于盲复原问题;如果已知,则转化为经典图像复原问题。因此,若能通过先验知识得到气动光学效应的降晰函数,则湍流退化图像的复原将变为一个经典的滤波问题,图像复原校正的效率就可以得到提高。

1.2 增量 Wiener 滤波器

增量 Wiener 滤波器^[13]是一种基于迭代的滤波器,并能保证反卷积误差的 L2 范数随着迭代次数的增加而减小。记反卷积误差 $S_1(\omega) = G(\omega) - F_{old}(\omega)H(\omega)$, Wiener 滤波器提供的估计可以写成:

$$F_{new}(\omega) = \frac{H^*(\omega)S_1(\omega)}{|H(\omega)|^2 + S_m(\omega)/S_x(\omega)} + \frac{|H(\omega)|^2}{|H(\omega)|^2 + S_m(\omega)/S_x(\omega)} \cdot F_{old}(\omega) \quad (3)$$

由于上式右端第二项分式部分:

$$\frac{|H(\omega)|^2}{|H(\omega)|^2 + S_m(\omega)/S_x(\omega)} \leq 1$$

因此,增量 Wiener 滤波器可以近似为:

$$F_{new}(\omega) = F_{old}(\omega) + \frac{H^*(\omega)S_1(\omega)}{|H(\omega)|^2 + \gamma} \quad (4)$$

式中: $\gamma = S_m(\omega)/S_x(\omega)$ 为噪声和信号功率谱的比值。

由此可以看出,增量 Wiener 滤波器工作于频率域,只有简单的乘法和加法运算,具有较高的计算效率,易于硬件实现,能够较快地收敛到可以接受的解,而且可以通过设定准则控制迭代的次数。上述优势使其非常适合于复原高速湍流引起的图像退化。

2 基于边缘平滑的湍流退化红外图像校正算法

文中复原算法为降晰函数(卷积核)已知条件下的迭代反卷积。为提高算法效率,反卷积算法使用增量 Wiener 滤波器。为了降低复原图像中的振铃效应,使用了边缘平滑技术以降低边缘区域的像素突变。

2.1 湍流退化图像的降晰函数估计

长曝光成像条件下,像模糊的降晰函数具有高斯函数形式:

$$h(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{c} \exp(-\alpha((i-i_0)^2 + (j-j_0)^2)), & (i, j) \in D_h \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

式中: D_h 为降晰函数的支持域; (i_0, j_0) 为 D_h 的中心点; c 为归一化系数,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,湍流退化图像的降晰函数辨识工作就是确定支持域 D_h 和参数 α 。

文中选择基于图像质量评价的湍流退化图像降晰函数辨识算法^[14],该算法对于信噪比高于 25 dB 的退化图像有较好的表现;同时,该算法还可以为后续迭代复原提供复原图像的起始估计。将估计得到的降晰函数标记为 h ,复原图像的起始估计记为 f_0 。

2.2 增量 Wiener 滤波器 γ 值的确定

虽然增量 Wiener 滤波器不需要噪声和信号功率谱的准确比值,但较大的 γ 会减缓算法的收敛速度,而较小的 γ 值又会使算法过快的收敛到一个常常不需要的逆滤波解。因此,合理的确定 γ 值既有利于提高收敛速度又有利于得到一个可以接受的复原结果。

文中噪声和信号功率谱比值 γ 取值记为:

$$\gamma = I/V_{sr} \quad (6)$$

式中: V_{sr} 为图像的信噪比,单位为 dB; I 为控制系数,与反卷积误差 S 和降晰函数支持域 D_h 有关:

$$I_i = \frac{k \times D_h \times \|S_{i-1} - S_{i-2}\|}{\|S_{i-1}\|} \quad (7)$$

式中: k 为控制参数; S_{i-2}, S_{i-1} 分别是第 $i-2, i-1$ 次迭代的反卷积误差, $i \geq 3$; $\|\cdot\|$ 表示 L2 范数; $l_1, l_2 = 10 \cdot D_h$ 。

从公式(6)、(7)可以看出, γ 的取值会随着迭代过程中图像的信噪比和反卷积误差动态变化,以在复原质量和收敛速度上平衡。准确计算退化图像的信噪比较困难,但在实际应用中有些学者给出了一些

近似估计并被证明可行,文中采用邹谋炎的估计方法。

2.3 边缘平滑

图像边缘对像素分布的连续性产生了破坏,因此,平滑边缘可以改善边缘处的连续性进而降低复原图像中的振铃效应。

对图像 f_0 的边缘使用 Canny 算法进行检测,得到二值边缘图像 B (边缘像素值为 1,非边缘像素值为 0)。采用大小为 3×3 的结构元素对 B 进行膨胀操作得到边缘区域 E_z ,则边缘图像 e 可以由公式(8)得到:

$$e(i, j) = \begin{cases} f_0(i, j), & (i, j) \in E_z \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

为减小图像 f_0 中边缘区域像素值的跳变,需对边缘区域进行适当的平滑以使其梯度幅值减小。文中使用均匀滤波器平滑边缘区域以得到边缘平滑后的起始复原图像 f'_0 :

$$f'_0(i, j) = \begin{cases} \text{uniform_filter}\{e(i, j)\}, & (i, j) \in E_z \\ f_0(i, j), & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

2.4 复原图像

将辨识到的降晰函数 h 及边缘平滑后的复原图像起始估计 f'_0 代入增量 Wiener 滤波器进行迭代复原。复原过程中可以设定迭代次数准则或图像质量改善量准则作为算法的终止条件。

3 实验结果与分析

为验证算法的有效性,文中在 Intel(R) Core(TM) 2.80 GHz CPU, 2.0 G 内存的硬件环境和 Windows Xp SP3 操作系统, MATLAB R2010a 软件环境下进行了实验。复原前采用 MATLAB 中的 Edgetaper 函数处理图像边界以抑制边界振铃。

实验中用到的参考图像如图 1 所示,图 1 大小为 320×240 ,实验采用信噪比改善量(Incremental Signal-to-Noise Ratio, ISNR)^[13]、振铃测度(Ringing Metric, RM)^[15]、特征结构相似度(Features Similarity Index, FSIM)^[16] 等图像质量评价指标衡量复原算法的性能。ISNR 表征了复原前后图像相对原始图像的信噪比改善情况,数值越大则复原图像的信噪比增益越大,图像质量越好。RM 描述了振铃效应的强度,其值越小算法抑制振铃的效果越好。FSIM 度量了复原图像与参考图像在特征结构上的相似程度,数值越接近 1,复原图像质量越好。



图 1 参考图像 helicopter
Fig.1 Original image helicopter

3.1 不同噪声级别下的对比实验

首先进行了不同噪声级别下的对比实验,退化图像采用 7×7 的高斯核($\alpha=5$)进行模糊,并加入不同级别的零均值高斯白噪声,实验结果如图 2 和表 1 所示。图 2 中第 1 行为不同噪声级别下的模糊图像,

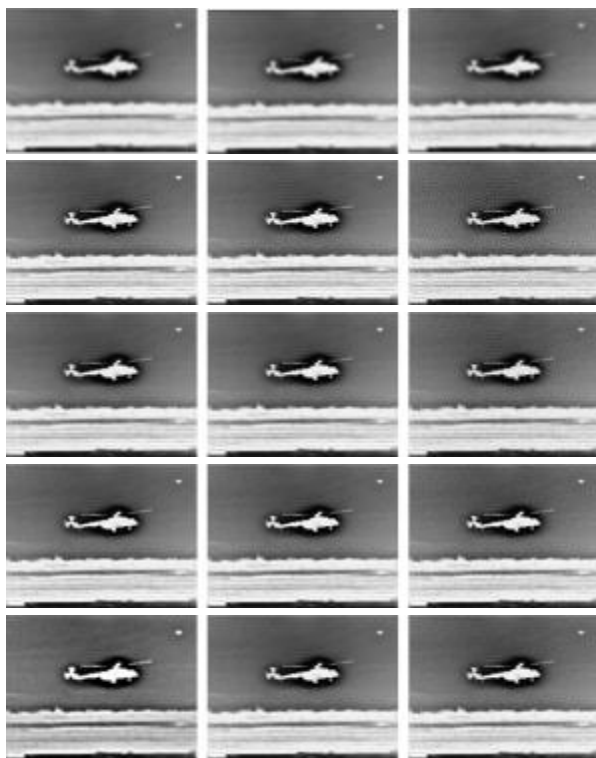


图 2 不同噪声级别下各种算法复原结果

Fig.2 Comparison of deblurred images with different noise variance

从左至右方差依次为 10^{-4} , 10^{-3} 和 10^{-2} ; 第 2~5 行分别为迭代盲复原算法 (Iterative Blind Deconvolution, IBD)、盲复原并 Fuzzy 滤波^[7](Fuzzy Filtering, FF)的去振铃算法、增量 Wiener 滤波算法 (Incremental Wiener, IW)和文中提出的基于边缘平滑的改进增量

Wiener 滤波算法 (Edge Smoothed IW, ESIW) 的复原结果。实验中每种算法都迭代 50 次。

表 1 实验 1 中复原图像的质量评价

Tab.1 Image quality assessment of restored in experiment 1

Noise variance	Restoration-method	ISNR/dB	RM	FSIM
10^{-4}	IBD	4.290 2	0.303 4	0.843 5
	IBD+FF	3.732 0	0.226 0	0.856 1
	IW	5.662 8	0.239 8	0.871 5
10^{-3}	ESIW	5.844 6	0.182 8	0.880 6
	IBD	4.054 0	0.306 9	0.837 5
	IBD+FF	3.707 6	0.241 5	0.855 0
10^{-2}	IW	5.567 5	0.236 9	0.870 3
	ESIW	5.691 9	0.176 0	0.878 4
	IBD	-4.33 2	0.428 7	0.612 1
	IBD+FF	1.671 3	0.325 9	0.783 0
	IW	2.468 0	0.280 8	0.783 9
	ESIW	2.645 1	0.252 3	0.789 8

从图 2 和表 1 中可以看出,当图像的模糊信号噪声比 (Blur Signal-to-Noise Ratio, BSNR) 较高时,几种算法的复原效果都比较好,而文中提出的 ESIW 算法具有更好的复原效果。随着 BSNR 的降低,几种复原算法的效果都有所下降,由于 IBD 算法会放大噪声,故其复原图像的质量最差;Fuzzy 滤波器能够抑制振铃和噪声,降低滤波后图像的振铃效应,在一定程度上提高了图像质量;增量 Wiener 滤波由于引入了规整化项,对噪声有一定的抑制作用。与传统增量 Wiener 滤波算法相比,文中算法由于对边缘进行了平滑,振铃效应有明显下降,图像质量 (ISNR, FSIM) 也有所提升。在各种 BSNR 条件下,文中算法对振铃效应都有明显的抑制作用,复原图像的振铃测度值都低于其他三种算法复原的结果。

3.2 湍流退化红外图像序列实验

为了验证复原算法对红外目标跟踪算法能力的影响,文中进行了红外退化图像序列的复原实验。图 3 是某目标场景的红外图像序列中的第 3 帧、225 帧、255 帧、300 帧和 365 帧,画面的分辨率为 320×256 。图 3 中 (a)~(e) 为复原前退化图像, (f)~(j) 为使用文中方法复原的对应图像。为验证图像复原对目标追踪

精度的影响,使用 Beyond Semi Adboost 跟踪算法^[18]对复原前后图像序列中的指定目标进行追踪,图 3 中黑色边框内的区域为追踪目标。第 225 帧退化图像(见图 3(b))由于追踪时丢失了目标,故没有黑色边框划定的区域。为了更准确地标识目标追踪的精度,图 4 给出了各帧追踪的偏移误差,图中 Y 轴采用了半对数坐标系。由于退化图像序列中存在跟踪目标丢失的情况,退化图像序列的跟踪误差曲线在第 224~227 帧之间存在间断。

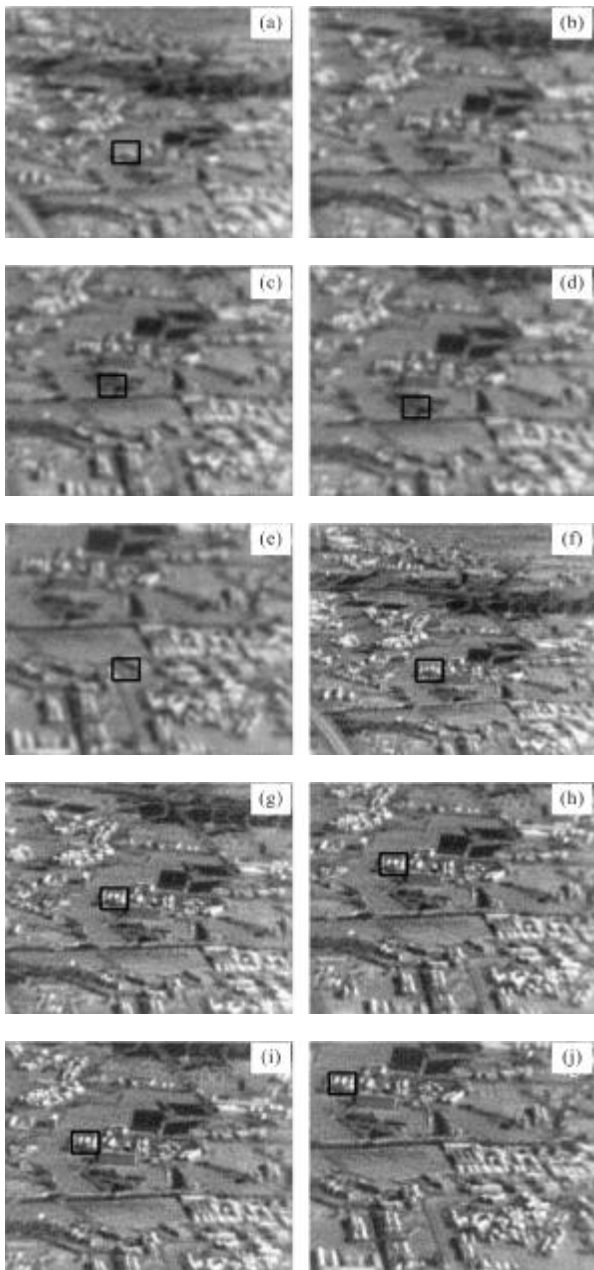


图 3 红外图像序列目标追踪结果

Fig.3 Sequence of target IR image tracking results

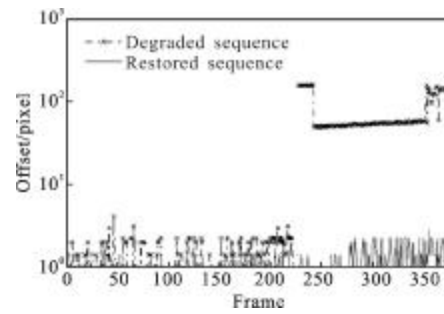


图 4 复原前后目标跟踪误差比较

Fig.4 Target tracing error comparison before and after the restoration

从图 3 和图 4 中可以看出,复原后图像的噪声得到了抑制,图像清晰度得到了提高,目标追踪的精度也大大提升,即使画面出现晃动,场景发生较大变化,追踪算法仍能够准确地跟踪目标。

为了比较各种算法的时间复杂度,表 2 给出了各种算法在相同迭代次数条件下复原同一幅(帧)图像的时间消耗。从表中可以看出,文中算法消耗的时间远小于 IBD 算法;相比 IW 算法,文中的算法也仅多消耗了 0.1 s。因此,文中算法的实时性优于迭代盲复原算法。

表 2 各算法时间复杂度对比(单位:秒)

Tab.2 Time complexity comparison of the algorithms (Unit:s)

Image	IBD	IBD+FF	IW	ESIW
Helicopter	3.429 5	4.171 6	1.005 7	1.109 4
3th frame of the image sequence	3.450 8	4.211 9	1.034 3	1.116 7

从以上两组实验的结果中可以看出,与 IBD 方法和 Fuzzy 滤波去振铃算法相比,文中算法能够更好地抑制振铃效应和提升复原图像的质量。与增量 Wiener 滤波算法相比,采用边缘平滑技术后,复原图像的振铃得到了减少,图像质量得到了提升。同时,相比迭代盲复原算法,文中算法也具有更好的实时性。

4 结 论

采用迭代盲目反卷积算法复原湍流退化图像时,由于降晰函数估计的误差常导致复原图像中存在大量的振铃,而算法的运算复杂度也难以满足实时性要求。文中提出的基于改进增量 Wiener 滤波器

的方法,为湍流退化红外图像的复原校正提供了一种新的思路。仿真实验结果表明,文中算法能很好地降低图像复原后存在的边缘振铃,图像的视觉质量和各种客观评价指标都得到了明显改善,同时算法具有较好的实时性。

参考文献:

- [1] Yin Xingliang. Principle of Aero-optics [M]. Beijing: China Astronautics Press, 2003. (in Chinese)
殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003.
- [2] Fei Jindong. Study on aero-optical effect technology for high speed missile infrared image guide [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1998, 27(1): 42-44. (in Chinese)
费锦东. 高速导弹红外成像末制导对气动光学效应技术研究的需求[J]. *红外与激光工程*, 1998, 27(1): 42-44.
- [3] Stanislav G, Jumper E, Hayden T E. Aero-optical effects of supersonic boundary layers[J]. *Aiaa Journal*, 2012, 50(3): 682-690.
- [4] Fu Changjun, Xu Dong, Zhao Yan. Blind restoration of turbulence-degraded image using maximum entropy algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 542-546. (in Chinese)
付长军, 许东, 赵剡. 湍流退化图像的最大熵盲目复原方法[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(3): 542-546.
- [5] Hong Hanyu, Li Liangcheng, Zhang Tianxu. Blind restoration of real turbulence-degraded image with complicated backgrounds using anisotropic regularization [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(24): 4977-4986.
- [6] Xiao Liping, Chen Anhong, Cao Ju, 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. (in Chinese)
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.
- [7] Hong Hanyu, Wang Jin, Zhang Tianxu, et al. Study on acceleration technique of circulation iterative restoration algorithm for infrared target images [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2008, 27(1): 115-118. (in Chinese)
洪汉玉, 王进, 张天序, 等. 红外目标图像循环迭代复原算法的加速技术研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2008, 27(1): 115-118.
- [8] Shao Hui, Wang Jianye, Xu Peng, et al. Turbulence-degraded image restoration method using the second-order accelerated Richardson-Lucy algorithm based on Huber regularization [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2012, 29(6): 657-664. (in Chinese)
邵慧, 汪建业, 徐鹏, 等. 基于 Huber 正则化二阶加速 Richardson-Lucy 湍流图像复原算法 [J]. *量子电子学报*, 2012, 29(6): 657-664.
- [9] Deshmukh A S, Medasani S S, Reddy G R. A fast hierarchical patch-based approach for mitigating atmospheric turbulence[C]//2013 ICACCI, 2013(8): 1-7.
- [10] Yang Ronghui, Chen Cheng. Engineering application method of aero-optic digital image correction [J]. *Modern Defence Technology*, 2012, 40(6): 19-22. (in Chinese)
杨荣慧, 陈澄. 气动光学数字图像校正工程应用方法探索 [J]. *现代防御技术*, 2012, 40(6): 19-22.
- [11] Banish M R. A validated code to predict the performance of broadband optical seekers through a turbulent transonic flow [R]. *AIAA SDIO Annual Interceptor Technology Conference*, 1992, AIAA 92-2792:1-6.
- [12] Zhao Yan, Zong Yunhua, Zhang Shijun, et al. Identification of blurs for aero-optics effect coordinate measuring machine [J]. *Acta Armamentarii*, 2005, 26(2): 188-191. (in Chinese)
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.
- [13] Zou Mouyan. Deconvolution and Signal Recovery [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. (in Chinese)
邹谋炎. 反卷积和信号复原 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [14] Zhang Shijie, Li Junshan, Yang Yawei, et al. Blur identification of turbulence-degraded IR images [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 473-480. (in Chinese)
张士杰, 李俊山, 杨亚威, 等. 湍流退化红外图像降晰函数辨识[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 473-480.
- [15] Balasubramanian M, Iyengar S S, Reynaud J, et al. A ringing metric to evaluate the quality of images restored using iterative deconvolution algorithms[C]//Proc of the 18th Int Conf on Systems Engineering, 2005:483-488.
- [16] Zhang Lin, Zhang Lei, Mou Xuanqin, et al. FSIM: a feature similarity index for image quality assessment[J]. *IEEE Trans Image Processing*, 2011, 20(8): 2378-2386.
- [17] Rao P R, Addai D B, Ramakrishna G, et al. Adaptive fuzzy filtering for artifact reduction in compressed images and videos [J]. *International Journal of Computer Science & Information Technology*, 2011, 3(1): 118-137.
- [18] Helmut Grabner. On-line boosting and vision [D]. Austria: Graz University of Technology, 2008.