

文章编号 1004-924X(2015)12-3456-09

抑制寄生波纹的红外图像降晰函数辨识算法

李俊山^{1,2*}, 樊景博¹, 杨亚威², 孙胜永², 任鑫博¹

(1. 商洛学院 经济与管理学院, 陕西 商洛 726000;

2. 第二炮兵工程大学 信息工程系, 陕西 西安 710025)

摘要:提出了一种针对军事目标红外模糊图像复原的降晰函数辨识算法。该算法根据气动光学效应形成湍流流场的机理建立相应的模型,将点扩展函数简化为可用参数描述的高斯函数形式;利用红外图像的边缘梯度变化特性提出边缘清晰度改善量,并作为降晰函数参数辨识的评价标准,清晰度改善量取最大值时对应的参数就是观测图像的最佳降晰函数参数;针对复原过程中可能出现的振铃效应,运用细节规整化思想衍生的加权空间复原算法,自适应地抑制寄生波纹的产生。实验验证表明,本文方法能有效地复原红外模糊图像,且对降晰函数的辨识准确率高,相对误差可以降低至4.5%左右。另外,抑制振铃寄生波纹效果良好。复原后图像在各项质量评价指标上都有很大提高,峰值信噪比提高量超过9.4 dB,综合评价指数 ImageQ 提高了 20 以上。

关键词:气动光学效应;红外模糊图像;降晰函数辨识;自适应复原;寄生波纹抑制;振铃效应

中图分类号:TP391;TN216 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152312.3456

Blur identification algorithm to suppress parasitic ripples on infrared images

LI Jun-shan^{1,2*}, FAN Jing-bo¹, YANG Ya-wei², SUN Sheng-yong², REN Xin-bo¹

(1. *Economics and Management Academy, Shangluo College, Shangluo 726000, China;*

2. Department of Information Engineering, the Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

** Corresponding author, E-mail: lijunshan403@163.com*

Abstract: A blur identification algorithm for infrared fuzzy image restoration in military targets was proposed. An appropriate model was established based on the formation mechanism of an aero-optical turbulent field. The point spread function was simplified to a Gaussian function form that could be described by parameters. On the basis of infrared images' edge gradient characteristics, the edge definition improvement was proposed to estimate the blurring parameters and to be acted as the standard of blur identification. When definition improvement was taken its maximum, the corresponding blurring parameter was the optimum parameter of an observation image. For the ringing effects occurred in restoration processing, weighted space restoration algorithm derived from detail regularization was used to adaptively suppress the parasitic ripple. Experimental results show that the algorithm effec-

收稿日期:2015-07-06;修订日期:2015-09-14.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61175120)

tively recovers infrared blur images, accurately identifies the blurring function and the relative errors have reduced to 4.5%. Moreover, the algorithm suppresses perfectly ringing effects during the image restoration process. Data show that all the quality evaluation indicators have been improved, the Peak Signal to Noise Ratio has improved by 9.4 dB and the comprehensive evaluation index ImgeQ improved more than 20.

Key words: aero-optical effect; infrared blur image; blur identification; adaptive restoration; parasitic ripple suppression; ringing effect

1 引言

超高速/高超声速飞行器在大气层内飞行时,红外导引头与空气作用产生的气动光学效应会使成像探测系统获得的目标图像质量严重下降,从而大大影响了导引头的目标探测、识别和跟踪能力^[1,2]。

气动光学效应的形成因素具有多样性、随机性,因此气动光学效应红外退化图像复原只能采用盲复原方法,而盲复原方法解决问题的关键在于能否辨识出退化图像的降晰函数。

文献[3]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,其能够对降晰函数进行辨识,并取得了比较好的复原效果。但是从该方法的实验结果曲线图中很容易发现,误差-参数曲线是单调变化的,没有极小值,难以获得准确的参数。文献[4]采用自回归模型推导出白化滤波器,实验结果证明了其有效性,但只估计出了降晰函数的尺寸,没有涉及降晰函数参数的辨识。Xu 等^[5]研究发现图像边缘与降晰函数之间有重要关系:显著的边缘并不能一直提升降晰函数的估计精确度;相反的是,如果目标尺寸比降晰函数小的话,边缘信息可能会破坏降晰函数的估计,也就是辨识降晰函数时需要较大的尺寸来保护边缘信息。

针对辨识红外图像降晰函数存在的问题,本文提出了一种能抑制振铃波纹的降晰函数辨识算法。介绍了算法的实现和验证过程,给出了利用该算法复原的红外图像的各项质量评价指标。

2 湍流退化降晰函数模型

点扩展函数的建立与图像类别和引起图像退化的因素有关^[6,7]。因此,要想用一个统一的点

扩展函数完全地表达出气动光学效应导致的像模糊是不可能的,所以本文只限于研究由湍流流场所导致的像模糊问题。湍流引起的图像退化效应可以用传递函数来描述,气动光学效应引起的湍流场计算可以分为平均流场和脉动流场两个部分^[8],将二者的光学传递函数相乘可得出总的气动光学效应传递函数为:

$$OTF_{\text{SUM}}(k_x, k_y) = OTF_{\text{MF}}(k_x, k_y) \cdot OTF_{\text{TF}}(k_x, k_y), \quad (1)$$

其中: $OTF_{\text{MF}}(k_x, k_y)$ 为平均流场的光学传递函数, $OTF_{\text{TF}}(k_x, k_y)$ 则是脉动流场的光学传递函数。

早在 20 世纪 60 年代,Chernov^[9]从随机理论出发研究光在非均匀介质中传播的波动理论时,就归纳出了湍流密度函数具有高斯函数形式。大量实验数据表明平均流场和脉动流场的高频分量是引起湍流退化的主要原因。Banish^[10]通过使用气动光学质量(Aero-optical Quality, AOQ)代码对红外导引头周围湍流的调制传递函数(MTF)进行了计算,得出

$$MTF = \exp\left\{-k^2 \sigma^2 \left[1 - \exp\left\{\frac{-r^2}{l_c^2}\right\}\right]\right\}, \quad (2)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$ 是波数, σ 是相位差的均方根, l_c 是湍流密度相关长度。

如果受限光孔直径远大于流场的相关长度,那么整个成像探测系统的 MTF 就由湍流的 MTF 主导。公式(2)中的 $\exp\left\{\frac{-r^2}{l_c^2}\right\}$ 项可以展开为:

$$\exp\left\{\frac{-r^2}{l_c^2}\right\} = 1 - \frac{r^2}{l_c^2} + \frac{1}{2} \frac{r^4}{l_c^4} + \dots, \quad (3)$$

那么在强湍流条件下, Banish 公式的调制传递函数可以进一步取近似值为

$$MTF = \exp\left\{\frac{-k^2 \sigma^2 r^2}{l_c^2}\right\}. \quad (4)$$

因为湍流场的 MTF 是点扩展函数(PSF)的

傅里叶变换,那么 PSF 就是 MTF 的傅里叶反变换,对式(5)进行傅里叶反变换,则可以得到:

$$\text{PSF} = \frac{l_c^2}{4\pi\sigma^2 f^2} \exp\left\{-\frac{l_c^2 \cdot r^2}{4\sigma^2 f^2}\right\}. \quad (5)$$

令 $\sigma_i = 2\sigma f/l_c$, $r^2 = x^2 + y^2$, 将式(5)进一步简化,可得:

$$\text{PSF} = \frac{1}{2\pi\sigma_i^2} \exp\left\{-\frac{(x^2 + y^2)}{\sigma_i^2}\right\}. \quad (6)$$

由此来看,上式是一个方差为 σ_i 的高斯函数,因此强湍流成像条件下的图像退化过程可以用高斯降晰函数表示。归一化的高斯降晰函数^[11]表示如下:

$$h(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{c} \exp(-\alpha((i-i_0)^2 + (j-j_0)^2)), & (i, j) \in D_h \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \quad (7)$$

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 是归一化函数,使得 $\sum h(i, j) = 1$ 。

从式(7)可以看出,这个 Gauss 函数是由支持域 D_h 和参数 α 共同表征的,因此辨识降晰函数就是确定 D_h 和 α 。

3 基于图像边缘清晰度改善量的降晰函数辨识

对于军事红外图像而言,所打击的目标一般处于特定的背景之中,其模糊降质主要表现为边缘部分的模糊。图像的边缘能够反映图像的清晰程度^[12],退化模糊图像的像素值变化比较缓慢,梯度变化较小,这也是导致视觉上模糊的主要原因^[13]。梯度的定义式为:

$$G(i, j) = \{[x(i, j) - x(i+2, j)]^2 + [x(i, j) - x(i, j+2)]^2\}^{1/2}, \quad (8)$$

式中: $x(i, j)$ 为 (i, j) 处的灰度值; $G(i, j)$ 为 (i, j) 处的梯度值。

文献[14]已经证明:梯度的变化幅度和图像的清晰程度成正比关系。反过来说,即复原后的图像边缘过渡区上的梯度值越大,图像的清晰度也就越高,那么图像复原质量就越好;梯度值改变的幅度越大,则图像清晰程度改变就越大,那么复原效果就越明显,因而图像的清晰度可以通过梯度这个量化值表示。

为了全方位地表示梯度的变化,通常在一个

像素点上沿着 0、45、90 和 135° 4 个方向滑动采样,所使用模板大小是 $1 \times (2M+1)$ (一般取 $M=2$),计算这 $(2M+1)$ 个梯度值的和,如式(9)所示:

$$\begin{cases} S_{0^\circ} = \sum_{m=-M}^M G(i+m, j) \\ S_{45^\circ} = \sum_{m=-M}^M G(i+m, j-m) \\ S_{90^\circ} = \sum_{m=-M}^M G(i, j+m) \\ S_{135^\circ} = \sum_{m=-M}^M G(i+m, j+m) \end{cases}. \quad (9)$$

比较这 4 个方向上梯度值的和,取梯度和值最大的点,就是各个方向上具有最大梯度的边缘位置 $P_{0^\circ}(i, j)$ 、 $P_{45^\circ}(i, j)$ 、 $P_{90^\circ}(i, j)$ 、 $P_{135^\circ}(i, j)$ 。 $P_{0^\circ}(x, y)$ 、 $P_{45^\circ}(x, y)$ 、 $P_{90^\circ}(x, y)$ 和 $P_{135^\circ}(x, y)$ 共同表示的区域就是临界边缘。

作为反映边缘过渡区复原情况的量值,清晰度改善量是复原后梯度与复原前梯度均值的平方差。分别计算复原图像 4 个方向上的清晰度改善量,表达式为:

$$\begin{cases} Q_{0^\circ} = \frac{1}{M_{0^\circ}} \sum_{D_e \in P_{0^\circ}(i, j)} (\hat{G}(i, j) - \mu_{0^\circ})^2 \\ Q_{45^\circ} = \frac{1}{M_{45^\circ}} \sum_{D_e \in P_{45^\circ}(i, j)} (\hat{G}(i, j) - \mu_{45^\circ})^2 \\ Q_{90^\circ} = \frac{1}{M_{90^\circ}} \sum_{D_e \in P_{90^\circ}(i, j)} (\hat{G}(i, j) - \mu_{90^\circ})^2 \\ Q_{135^\circ} = \frac{1}{M_{135^\circ}} \sum_{D_e \in P_{135^\circ}(i, j)} (\hat{G}(i, j) - \mu_{135^\circ})^2 \end{cases}. \quad (10)$$

那么总的清晰度改善量是这 4 个清晰度改善量的和,为

$$Q = Q_{0^\circ} + Q_{45^\circ} + Q_{90^\circ} + Q_{135^\circ}, \quad (11)$$

式中: D_e 表示边缘区域; $\hat{G}(i, j)$ 表示复原图像在 (i, j) 处的梯度; $M_e \supset (M_{0^\circ} M_{45^\circ} M_{90^\circ} M_{135^\circ})$ 表示边缘区域的像素个数; $\mu \supset (\mu_{0^\circ} \mu_{45^\circ} \mu_{90^\circ} \mu_{135^\circ})$ 为退化图像边缘区域的梯度均值; Q 表示复原图像相对于原始图像边缘区的梯度平方差。

迭代选取不同的支持域 D_h 和参数 α 表征的降晰函数 h , 并计算相应的复原图像的清晰度改善量 Q 。最大的 Q 值对应的支持域 D_h 和参数 α 就是辨识的理想降晰函数参数,相应的降晰函数 h 就是最终的辨识结果。

4 自适应图像复原

振铃效应普遍存在于图像复原过程中。振铃效应的存在会混淆图像的高频特性,破坏迭代算法的收敛条件,使算法难以收敛。另外,它还会导致图像复原质量下降,对目标信息的识别和提取造成干扰。文献[15]提出的基于 Wiener 滤波的频域循环边界复原算法是一种比较经典的复原算法;文献[16][17]提出的 SA-DCT 复原算法和 FTVD 复原算法是两种较新的算法,它们虽然都能有效抑制振铃效应,但是它们对于可见光图像效果较好,对于军事红外图像复原的振铃效应抑制效果不理想,算法不稳定。

为了抑制振铃波纹,本文考虑针对图像的不同区域加以局部的自适应限制,即在图像的平坦区域加强平滑而减弱复原,在边缘附近加强复原而减弱平滑。

图像复原是一个反卷积过程,反卷积具有病态性,而非周期矩阵反卷积模型不仅可以减缓反卷积问题的病态,还可以减少在空域迭代算法中的计算量。在非周期矩阵模型下,图像的降质方程可表示如下:

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}_h \mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (12)$$

式中, \mathbf{F}_h 是非周期卷积核矩阵。

基于规整化的思想,在图像复原过程中对图像做两个限制^[18]:

$$\|\mathbf{y} - \mathbf{F}_h \mathbf{x}\| \leq \epsilon \text{ 以及 } \|\mathbf{F}_c \mathbf{x}\| \leq E, \quad (13)$$

式中: \mathbf{F}_c 是复原图像的非周期卷积核矩阵; ϵ 和 E 是指定的两个界。 ϵ 取决于降质图像噪声能量的大小, E 是由复原图像高频能量决定的。

为了能够在图像的平坦区域加强平滑、减弱复原,在边缘附近加强复原而减弱平滑,本文通过控制局部适应性抑制寄生波纹的产生,引入两个加权对角矩阵 \mathbf{R} 和 \mathbf{S} , 将式(12)修改为:

$$\|\mathbf{y} - \mathbf{F}_h \mathbf{x}\|_{\mathbf{R}} = [(\mathbf{y} - \mathbf{F}_h \mathbf{x})^T \mathbf{R} (\mathbf{y} - \mathbf{F}_h \mathbf{x})]^{1/2} \leq \epsilon, \quad (14)$$

$$\|\mathbf{F}_c \mathbf{x}\|_{\mathbf{S}} = [(\mathbf{F}_c \mathbf{x})^T \mathbf{S} (\mathbf{F}_c \mathbf{x})]^{1/2} \leq E, \quad (15)$$

式中: 矩阵 \mathbf{R} 和 \mathbf{S} 包含的元素是权系数 r_{ij} 和 s_{ij} 。 r_{ij} 的作用是增强图像的棱边,减少像素点的丢失; s_{ij} 的作用是控制局部区域的平滑性,从而抑制振铃寄生波纹。

由前面的论述可知,在图像的过渡区域必须

使用大的 r_{ij} 和小的 s_{ij} ,而在平坦区域,则正好相反。 r_{ij} 和 s_{ij} 的选取将直接影响复原效果,可按照下面两个原则选取:

$$s_{ij} = \frac{1}{1 + \lambda \max[0, \sigma_y^2(i, j) - \sigma_\epsilon^2]}, \quad (16)$$

$$r_{ij} = \frac{1}{1 + (\lambda \max[0, \sigma_y^2(i, j) - \sigma_\epsilon^2])^{-1}}, \quad (17)$$

式中: λ 是一个可选参数, $\sigma_y^2(i, j)$ 是观测图像 $y(i, j)$ 的局部方差。

由式(12)和式(13)可得到单个规整化不等式为:

$$\mathbf{J}_w(\mathbf{x}) = [(\mathbf{y} - \mathbf{F}_h \mathbf{x})^T \mathbf{R} (\mathbf{y} - \mathbf{F}_h \mathbf{x}) + \alpha [(\mathbf{F}_c \mathbf{x})^T \mathbf{S} (\mathbf{F}_c \mathbf{x})]] \leq 2\epsilon^2, \quad (18)$$

式中: $\alpha = \left(\frac{\epsilon}{E}\right)^2$ 。将 $\mathbf{J}_w(\mathbf{x})$ 最小化得到下列方程式:

$$(\mathbf{F}_h^T \mathbf{R} \mathbf{F}_h + \alpha \mathbf{F}_c^T \mathbf{S} \mathbf{F}_c) \mathbf{x} = \mathbf{F}_h^T \mathbf{R} \mathbf{y}. \quad (19)$$

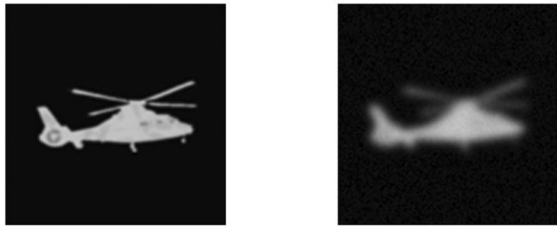
这个方程式的求解只能通过迭代实现,为了加快算法的收敛速度,通常使用共轭梯度法求解。因为算法使用了非周期循环矩阵模型,消除了规整化后方程解存在病态的可能性,所以共轭梯度迭代算法不会发散,而且收敛速度较快。

5 实验验证与分析

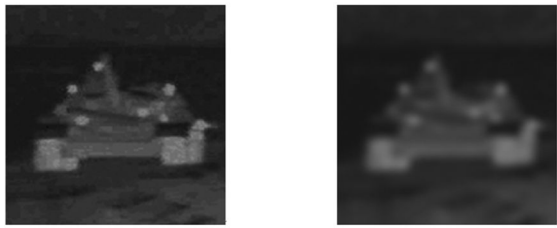
5.1 实验 1: 降晰函数参数辨识

选择 3 幅不同的图像进行对比验证实验,如图 1 所示。直升机飞行图 1(a)代表空中打击目标,加上实验条件为 $D_h = 13 \times 13, \alpha = 1.5$ 的高斯模糊后,如图 1(b)所示;坦克图 1(c)代表地面打击目标,加上实验条件为 $D_h = 9 \times 9, \alpha = 2.5$ 的高斯模糊后,如图 1(d)所示;图 1(e)是从气动光学效应实验所得的红外图像图中截取的一部分,其降晰函数尺寸大小未知。

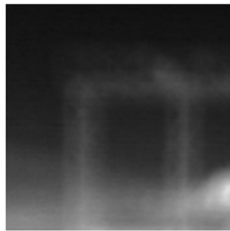
对给定的支持域 $D_h \in [D_{\min}, D_{\max}]$, 分别计算参数 α 在 $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$ 内变化时的清晰度改善量 Q 的值,就可以得到不同支持域条件下的 $Q-\alpha$ 曲线。以直升机飞行模糊图的辨识结果为例, $D_h \in [7, 15], \alpha \in [0.005, 3.500]$, 如图 2 所示。清晰度改善量 Q 取最大值时对应的支持域 D_h 和参数 α 就是理想的降晰参数。从图 2 可以发现,直升机飞行模糊图在 Q 取最大值(约为 0.85)时辨识的最佳参数为 $D_h = 13 \times 13, \alpha = 1.68$, 基本符合图像模糊的真实尺寸。



(a) 直升机飞行图 (b) $D_h = 13 \times 13, \alpha = 1.5$
 (a) Flying chart of helicopter (b) $D_h = 13 \times 13, \alpha = 1.5$



(c) 坦克图 (d) $D_h = 9 \times 9, \alpha = 2.5$
 (c) Image of tank (d) $D_h = 9 \times 9, \alpha = 2.5$



(e) 气动光学效应实验截图
 (e) Experiment screenshot of aero-optical effect

图 1 对比验证实验

Fig. 1 Comparative validation experiment

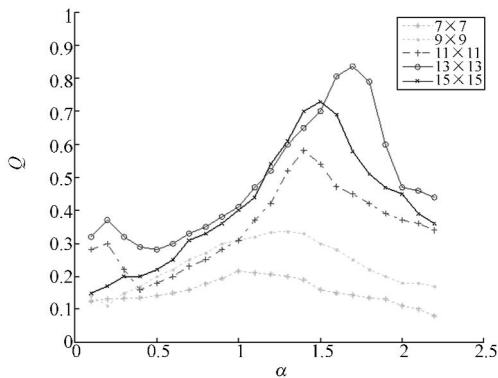


图 2 清晰度改善量随参数变化曲线

Fig. 2 Definition improvement varies with α

由于直升机飞行图和坦克图的模糊尺寸已知,所以参照点明显。从表中可以看出,距离模糊尺寸的点越近, Q 值越大。由表中所给出的数据可知,两幅图取最大 Q 值时的降晰函数尺寸分别为 $D_h = 13 \times 13, \alpha = 1.58$ 和 $D_h = 13 \times 13, \alpha = 2.61$, 相对真实尺寸的误差分别降低至 5.3% 和 4.4%, 证明该算法准确有效。气动光学效应截图在 $D_h = 13 \times 13, \alpha = 3.31$ 和 $D_h = 15 \times 15, \alpha = 3.02$ 取得了相近最大值, 为影响对尺寸的直接判断, 说明气动光学效应的形成机理比较复杂, 降晰函数参数辨识不稳定, 但这符合实际情况, 因为真实图像模糊尺寸本身就是未知的。为了增强复原后图像的对比度, 使边缘轮廓更加明显, 以便于后续图像处理, 选择尺寸较大的参数作为辨识结果, 这里可选取 $D_h = 15 \times 15, \alpha = 3.31$ 。

本文采用文献[3]方法对这 3 幅图像的降晰函数进行辨识, 结果分别为 $D_h = 13 \times 13, \alpha = 1.59$ 、 $D_h = 7 \times 7, \alpha = 2.12$ 和 $D_h = 13 \times 13, \alpha = 2.83$, 其中直升机飞行图的辨识结果最好, 与本文方法的相对误差结果相似, 坦克图辨识结果与真实值差距较大。实验结果说明文献[3]的方法适合于背景简单的小目标图像降晰函数辨识, 对于背景较复杂的图像不太适用。

表 1 不同支持域下的 α 辨识结果

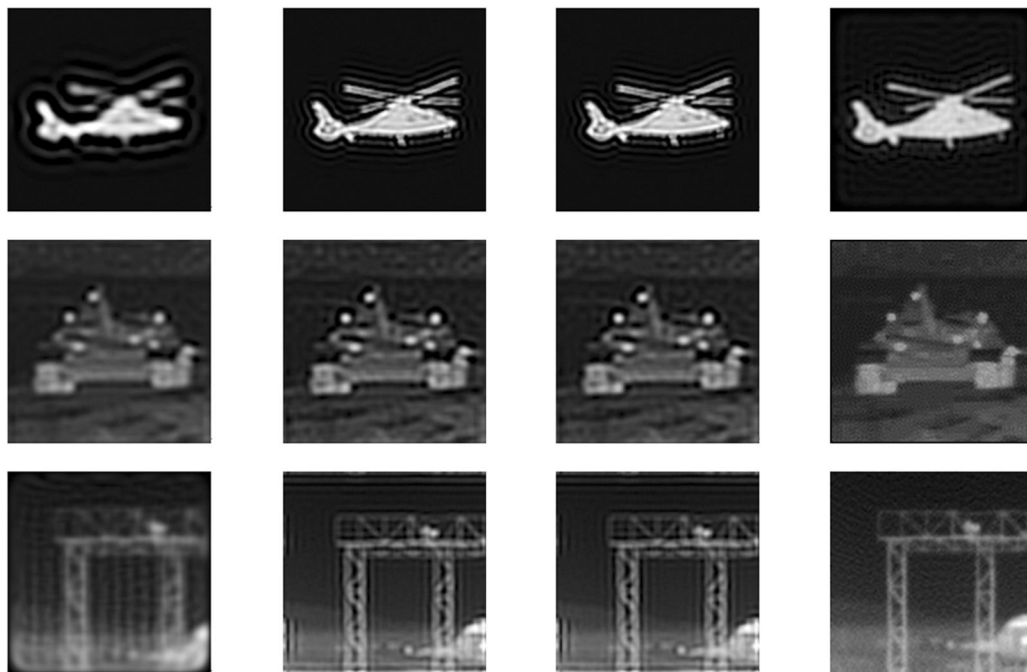
Tab. 1 Identification results of α under different support domains

图像	支持域	Q_{max}	α	相对误差/(%)
直升机	7×7	0.216	0.98	-34.7
	9×9	0.336	1.32	-12.0
	11×11	0.682	1.39	-7.3
	13×13	0.854	1.58	5.3
	15×15	0.790	1.67	11.3
坦克	5×5	0.438	1.53	-38.8
	7×7	0.477	2.01	-19.6
	9×9	0.563	2.61	4.4
	11×11	0.551	2.74	9.6
气动光学效应截图	5×5	0.324	1.83	—
	7×7	0.358	1.62	—
	7×7	0.374	2.63	—
	11×11	0.393	3.04	—
	13×13	0.410	3.31	—
	15×15	0.409	3.02	—

表 1 给出了 3 组实验在不同支持域中, 清晰度改善量取最大值时获得的参数 α (部分数据)。

5.2 实验 2: 图像复原

在实验 1 辨识出降晰函数尺寸的基础上, 对



(a) Wiener 循环边界复原 (b) SA-DCT 复原 (c) FTVD 复原 (d) 自适应复原
 (a) Wiener circulation border restoration (b) SA-DCT restoration (c) FTVD restoration (d) Adaptive restoration

图 3 几种方法的复原结果

Fig. 3 Restoration results of different methods

3 组模糊图像进行复原,结果如图 3 所示。由图 3 可知,使用 Wiener 循环边界法、SA-DCT 法、FTVD 法和自适应复原法都能在很大程度上消除红外图像的模糊,但是 Wiener 循环边界法、SA-DCT 法和 FTVD 法复原后的振铃效应很严重,产生了平行目标边缘的伪像。在第三组气动光学效应截图中,复原后的图像不仅出现了边界截断振铃效应,还产生了严重的寄生波纹,这是由于降晰函数尺寸过大导致的。

加权空间自适应复原方法得到的图像不仅棱边分明、目标区域轮廓清晰可见,而且抑制了寄生波纹的产生,图像的细节信息保存的比较完整。

复原完成后分别采用峰值信噪比(PSNR)和基于各向异性的图像质量评价^[19](BIQIA)方法来评价直升机飞行图和坦克图的复原质量。因为这两幅图原图已知,属于有参考图像质量评价,PSNR 和 BIQIA 越大,则图像复原质量越好。气

动光学效应截图无参考图像质量评价采用拉普拉斯梯度模(LS)和图像复原质量综合评价指数 ImageQ^[20]进行评价,结果如表 2 所示。

从表中数据可以看出,利用本文算法所得的各项评价指标都有很大程度的提高。直升机和坦克图的峰值信噪比(PSNR)在复原前后均提高了 9.4 dB 以上,比另外 3 种方法的复原效果提高了很多。其中图像复原质量综合评价指数 ImageQ 包括了对图像边缘恢复和伪像消除的综合评价,既符合人眼视觉评判标准,也能反映对图像寄生波纹的抑制效果。表中数据显示复原前后 ImageQ 提高多达 20 以上。

综合图 3 和表 2 可以得出以下结论:(1)本文算法对降晰函数的辨识准确;(2)相对 Wiener 循环边界复原算法、SA-DCT 复原算法和 FTVD 复原算法,加权空间自适应图像复原方法更适合对红外退化图像的恢复,对寄生波纹抑制效果良好。

表 2 图像复原质量评价

Tab. 2 Quality assessment of image restoration

图像	复原方法	质量评价			
		PSNR/dB	BIQA	LS	ImageQ
直升机	模糊图	19.483	0.004 1	0.546	7.64
	Wiener 循环边界复原	26.745	0.004 5	0.736	22.57
	SA-DCT 复原	28.268	0.004 9	0.784	28.48
	FTVD 复原	28.104	0.004 9	0.831	29.38
	本文算法	28.832	0.005 9	0.782	31.32
坦克	模糊图	20.620	0.003 0	0.483	6.83
	Wiener 循环边界复原	26.362	0.003 7	0.587	19.03
	SA-DCT 复原	25.466	0.004 0	0.580	24.72
	FTVD 复原	27.163	0.003 9	0.589	25.31
	本文算法	28.953	0.004 3	0.603	26.71
气动光学 效应截图	模糊图	—	—	0.316	4.35
	Wiener 循环边界复原	—	—	0.975	23.01
	SA-DCT 复原	—	—	0.835	24.16
	FTVD 复原	—	—	0.882	23.86
	本文算法	—	—	1.104	30.82

6 结 论

文中以气动光学效应下红外图像的应用环境为背景,提出了一种能够抑制振铃波纹的降晰函数辨识算法。通过光学湍流分析,建立了气动湍流的高斯退化模型;利用图像的边缘特征,提出了边缘清晰度改善量,并将其作为降晰函数参数的评判标准;在已辨识出降晰函数的基础上,利用加

权空间自适应复原方法对观测图像进行复原,既保持了红外图像的细节,又减弱了噪声。实验表明,本文方法能有效地实现对红外模糊图像的复原,不仅对降晰函数的辨识准确率高,相对误差可以降低至 4.5% 左右,而且抑制振铃寄生波纹效果良好。复原后图像的各项质量评价指标都有很大程度提高,峰值信噪比提高量超过 9.4 dB,综合评价指数 ImageQ 提高了 20 以上。

参考文献:

- [1] JUMPER E J, FITZGERALDE J. Recent advances in aero-optics[J]. *Progress in Aerospace Science*, 2001, 37: 299-339.
- [2] 曹东, 金钢, 安涛, 等. 基于分数阶傅立叶变换的湍流退化图像相位恢复算法研究[J]. *空气动力学学报*, 2010, 28(4): 381-384.
CAO D, JIN G, AN T, *et al.*. Phase retrieval algorithm for turbulence-degraded image based on fractional Fourier transform [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2010, 28(4): 381-384. (in Chinese)
- [3] 赵剌, 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[J]. *Acta Armamentar II*, 2005, 26(2): 188-191. (in Chinese)

- [4] 赵剡,张春晓. 改进的基于白化滤波器的降晰函数尺寸估计方法[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 896-901.
ZHAO Y, ZHANG CH X. Improved method of blur support size identification based on the whiten filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 896-901. (in Chinese)
- [5] XU L, JIA J Y. Two-phase kernel estimation for robust motion deblurring[C]. *Proceedings of the 11th European Conference on Computer Vision*, 2010, 6311: 157-170.
- [6] 孟伟,金龙旭,李国宁,等. 调制传递函数在遥感图像复原中的应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5):1690-1696.
MENG W, JIN L X, LI G N, *et al.*. Application of MTF in remote sensing image restoration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1690-1696. (in Chinese)
- [7] 贤光,颜昌翔,张新洁. 运动模糊图像点扩散函数的频谱估计法[J]. 液晶与显示, 2014, 29(5): 751-755.
XIAN G, YAN CH X, ZHANG X J. Motion-blurred image point spread function estimation method based on spectral analysis [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5):751-755. (in Chinese)
- [8] 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): 514-521.
ZHANG SH J, LI J SH, YANG Y W, *et al.*. Blur identification of turbulence-degraded IR image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 514-521. (in Chinese)
- [9] CHERNOV L A. *Wave Propagation in a Random Medium*[M]. New York: McGraw-Hill, 1960.
- [10] BANISH M, CLARK R L, KATHMAN A. A validated code to predict the performance of on-board broadband optical seekers through a turbulent transonic flow[C]. *AIAA ADIO Annual Interceptor Technology Conference*, Huntsville, Alabama, 1992.
- [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] 程光权,张继东,成礼智,等. 基于几何结构失真模型的图像质量评价研究[J]. 自动化学报, 2011, 37(7):811-819.
CHENG G Q, ZHANG J D, CHENG L ZH, *et al.*. Image quality assessment based on geometric structural distortion model [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(7):811-819. (in Chinese)
- [13] 葛仕明,程义民,李杰,等. 基于边缘和梯度场的图像表示和压缩方法[J]. 中国科学院研究生院学报, 2009, 26(2):235-242.
GE SH M, CHENG Y M, LI J, *et al.*. Image representation and compression using edge and gradient field [J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2009, 26(2): 235-242. (in Chinese)
- [14] 倪军,袁家虎,吴钦章. 基于边缘特征的光学图像清晰度判定[J]. 中光激光, 2009, 36(1):172-176.
NI J, YUAN J H, WU Q ZH. Identification for optical image definition based on edge feature [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(1):172-176. (in Chinese)
- [15] 赵剡,李东兴,许东. 抑制复原图像振铃波纹的频域循环边界算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(11): 1290-1293.
ZHAO Y, LI D X, XU D. Circulation edge algorithm in frequency domain to suppress the ringing ripples on the restored image [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(11): 1290-1293. (in Chinese)
- [16] FOI A, DABOV K, KATKOVNIK V, *et al.*. Shape-adaptive DCT for denoising and image reconstruction[C]. *Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging*, 2006, 203-214.
- [17] WANG Y L, YANG J F, YIN W T, *et al.*. A new alternating minimization algorithm for total variation image reconstruction [J]. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2008, 1(3): 248-272.
- [18] LAGENDIJK R L, BIEMOND J, BOEKEE D E. Regularized iterative image restoration with ringing reduction [J]. *IEEE Trans. Acoust. Speech*

- Signal Proc.*, 1988, 36:1874-1888.
- [19] GABARDA S, CRISTÓBAL G. Blind image quality assessment through anisotropy[J]. *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 2007, 24(12):42-51.
- [20] 耿则勋, 陈波, 王振国, 等. 自适应光学图像复原理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- GENG Z X, CHEN B, WANG ZH G, *et al.*. *Adaptive Optics Image Restoration Theory and Method* [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)

作者简介:



李俊山(1956—),男,陕西白水人,博士,教授,博士生导师,1981于国防科技大学获得学士学位,1988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方面的研究。E-mail:lijunshan403@163.com



樊景博(1966—),男,陕西洛南人,1989年7月于陕西师范大学物理系获得学士学位;1999年9月至2000年7月在西北大学计算机学院研究生班学习研究生课程,并先后在西安交通大学和陕西师范大学作访问学者和进修学习;主要从事信息系统分析和信息处理方面的研究。

(版权所有 未经许可 不得转载)