

文章编号: 0253-2239(2009)02-0347-06

# 气动光学效应分析与气动模糊图像复原

杨文霞<sup>1,2</sup> 蔡超<sup>1</sup> 丁明跃<sup>1</sup> 周成平<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 华中科技大学图像识别与人工智能研究所多谱图像信息处理国防重点实验室, 湖北 武汉 430074;

<sup>2</sup> 武汉理工大学理学院数学系, 湖北 武汉 430070)

**摘要** 针对超音速飞行器在大气中飞行时所产生的湍流脉动气动光学效应进行了理论分析与计算, 并对气动模糊图像进行了复原。首先根据计算流场时使用的湍流模型及其控制方程, 计算脉动流场气动光学效应所对应的点扩散函数。计算结果表明, 气动光学点扩散函数的幅度响应函数具有低通特征, 使目标图像成像模糊。在相同飞行高度下, 马赫数越高, 图像模糊越严重。通过把气动光学效应传递函数应用于风洞实验吹风前图像, 并将得到的气动模糊图像与吹风后实测图像的对比, 验证了理论点扩展函数的正确性。最后, 提出了一种改进的 Landweber 迭代图像复原方法对气动光学效应进行了校正。该方法在每一步迭代时对松弛因子进行修正, 具有较快收敛速度和更好的复原效果。

**关键词** 气动光学; 图像复原; 风洞实验; 迭代算法

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0347

## Characterization of Aero-Optic Effects and Restoration of Aero-Optical Degraded Images

Yang Wenxia<sup>1,2</sup> Cai Chao<sup>1</sup> Ding Mingyue<sup>1</sup> Zhou Chengping<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Multi-Spectral Image Information Processing Key Laboratory of National Defense, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;  
<sup>2</sup> Department of Mathematics, Wuhan University of Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract** Computational analysis of the aero-optic effects caused by hyper-speed fluctuation fields was presented, and the blurred infrared image was restored. First, a time-averaged modulation transfer function (MTF) which represents the aero-optic effects was derived, experimental results show that the amplitude response of the transmission function of the aero-optical effect can be characterized as a low-pass filter, which results in the blurring of the objects in the acquired infra-red images. The higher speed, the more serious image was blurred at the same flight height. Furthermore, the correctness of the theoretical MTF was evaluated by wind tunnel experiment. Finally, an adaptive Landweber iteration method was proposed to restore the blurred images, which updated the relaxation factors at each iteration. Experiments demonstrated that the method has higher convergence rate and better restoration effect.

**Key words** aero-optics; image restoration; wind tunnel experiment; iteration algorithm

## 1 引 言

气动光学效应<sup>[1]</sup>使得飞行器导引头光学系统接收到的目标图像产生畸变, 这种畸变对于红外目标的自动跟踪和识别将产生不利影响, 并可能导致导弹拦截和打击目标准确度的降低。因此, 气动光学

效应的理论研究及其校正技术研究是实现高超音速导弹成像探测及精确制导与寻的所必须解决的关键问题之一<sup>[2]</sup>。气动光学校正可以用硬件实现<sup>[3,4]</sup>, 但代价昂贵, 对实验设备要求非常高。湍流退化图像的复原是气动光学效应校正的重要内容<sup>[5~7]</sup>。气动

收稿日期: 2008-08-26; 收到修改稿日期: 2008-10-15

基金项目: 航空科学基金(20060112101)。

作者简介: 杨文霞(1978-)女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为气动光学效应及其校正、图像复原等。

E-mail: wenxiayang@163.com

导师简介: 丁明跃(1961-)男, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为图像处理、模式识别、计算机视觉。

E-mail: myding@hust.edu.cn

光学效应校正必须具备快速、高效的特点。本文首先通过理论计算与仿真,得到气动光学效应的光学传递函数,并对其引起的像模糊进行了分析,采用风洞实验数据验证了该传递函数的准确性;其次,基于对于 landweber 迭代算法所进行的改进,给出了一种新的气动光学效应模糊图像的复原算法。最后,通过与实测图像的比较结果证明了本文所提算法的有效性。

## 2 气动光学效应理论分析与实验验证

### 2.1 脉动流场气动光学效应的理论分析

在研究超音速/高超音速飞行器的气动光学效

应时,可将湍流流场分解成一个时间平均流场加上一个脉动流场,然后分别计算它们对红外成像的影响。在文献[8]中,作者在 CFD 基础上得到了飞行器周围激波流场的参数分布,并用传递函数表示时间平均流场的气动光学效应。对于脉动流场的气动光学效应计算,主要使用统计方法,求出折射率脉动在光传播方向上所引起的相位脉动协方差,并得到脉动流场的系综平均光学传递函数。在工程计算中,常假设对于折射率脉动的均方差  $\langle (n')^2 \rangle$  可以由湍流动能耗  $k$  和湍流动能耗散率  $\epsilon$  计算得到,且具有和  $k - \epsilon$  传输方程完全相同的形式<sup>[9]</sup>。于是有

$$\underbrace{\rho u \frac{\partial \langle (n')^2 \rangle}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \langle (n')^2 \rangle}{\partial y} + \rho w \frac{\partial \langle (n')^2 \rangle}{\partial z}}_{\text{convection term}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_l + \mu_t}{\sigma_g} \frac{\partial \langle (n')^2 \rangle}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_l + \mu_t}{\sigma_g} \frac{\partial \langle (n')^2 \rangle}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_l + \mu_t}{\sigma_g} \frac{\partial \langle (n')^2 \rangle}{\partial z} \right)}_{\text{diffusion term}} + \underbrace{C_{1g} \mu_t \left[ \left( \frac{\partial n}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial n}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial n}{\partial z} \right)^2 \right]}_{\text{production term}} - \underbrace{C_{2g} \frac{\rho \langle (n')^2 \rangle \epsilon}{k}}_{\text{dissipation}} \quad (1)$$

不考虑化学反应和大气电离等效应,在平衡流场的假设下,(5)式中对流项和扩散项相等<sup>[10]</sup>,于是乘项和耗散项相等。故有

$$C_{1g} \mu_t \left[ \left( \frac{\partial n}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial n}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial n}{\partial z} \right)^2 \right] = C_{2g} \frac{\rho \langle (n')^2 \rangle \epsilon}{k} \quad (2)$$

在本文所满足的高雷诺数条件下,湍流粘性为

$$\mu_t = \frac{C_{\mu} \rho k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

代入(6)式,有

$$[(n')^2] = \frac{C_{1g} C_{\mu}}{C_{2g}} \cdot \frac{k^3}{\epsilon^2} \cdot \left[ \left( \frac{\partial n}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial n}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial n}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (4)$$

经验常数  $C_{1g}$ ,  $C_{2g}$ ,  $C_{\mu}$  取值分别为 2.80, 1.40 和 0.09。为湍流脉动相关长度。

折射率脉动流场是随机非均匀介质,本文中探测器的积分时间远远大于流场起伏的特征时间。在研究其对红外成像的影响时,红外图像可看成是远场光强,可通过对电场的系综平均给出<sup>[11]</sup>

$$I_R(\theta_x, \theta_y) = \langle u u^* \rangle = \frac{1}{\lambda^2 R^2} \iiint \iiint u_0(x, y) u(x', y') \times \exp\{ik[\int n(x, y, z) dz - \int n(x', y', z) dz]\} \times$$

$$\exp[ik\theta_x(x' - x)] \exp[ik\theta_y(y' - y)] dx' dy' dz \quad (5)$$

其中,随机介质的影响表现为被积函数中乘项的第二项。由于其随机性,将它的系综平均定义为随机脉动流场的光学传递函数,即

$$\tau_M = \langle \exp\{ik[\int n(x, y, z) dz - \int n(x', y', z) dz]\} \rangle \quad (6)$$

上式直接计算比较困难,可以做进一步假设。Sutton<sup>[11]</sup>证明,大多数折射率脉动流场满足高斯分布。对上式做进一步简化后<sup>[12]</sup>,

$$C(x, y, z) = [n(x + x', y + y', z + z'), n(x', y', z)] \quad (7)$$

(7)即折射率脉动相关函数。则公式(6)化为

$$\tau_M(x, y) = \exp\{-k^2[\varphi(0, 0) - \varphi(x, y)]\} \quad (8)$$

其中  $k$  为波数,

$$\varphi(x, y) = \int_0^R \int_{-z}^{R-z} [n(x', y', z')]^2 C(x, y, z) dz dz' \quad (9)$$

图 1 为在实验条件为 5 Mach、10 km, 红外波长  $8 \mu\text{m}$ , 0 攻角的飞行条件下,弹头边界和当地平均密度流场,图 2 为分别是 5 Mach 和 3 Mach 的脉动流场气动光学效应点扩散函数,用  $|H_2(u, v)|$  表示。

幅频响应曲线表明,折射率脉动引起的气动光学效应相当于一个低通滤波器,会导致严重的图像模糊。而在相同的飞行高度下,飞行速度越高,该低通滤波器的截止频率越低,从而引起的图像模糊越严重。而相位响应函数则表明其具有非线性随机位移特性,使得目标的红外成像发生非线性位置偏移和畸变。

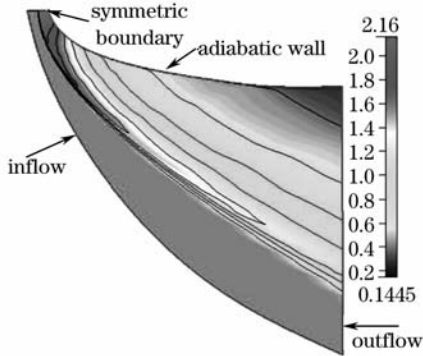


图1 密度流场(kg/m<sup>3</sup>)

Fig.1 Density flow field(kg/m<sup>3</sup>)

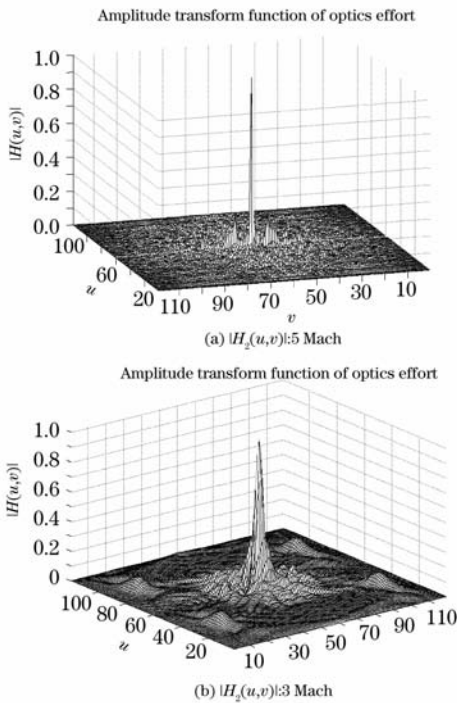


图2 MTF的幅频响应函数

Fig.2 Amplitude response function of MTF

## 2.2 气动光学效应的实验验证

### 2.2.1 实验设计

实验模拟飞行速度为 5 Mach、0 攻角时的近地飞行 ( $H = 10$  km) 弹道导弹非制冷蓝宝石红外侧窗对常温目标红外辐射的影响。采用比较测量法,首先获取目标透过常温下蓝宝石镜片的图像;再获取目标透过热吹风情况下的蓝宝石镜片的图像,以观

测气动光学效应对红外成像的影响。本试验的原理图如图 3 所示。图 4(a)是吹风前的目标透过常温下蓝宝石镜片的目标图像,图 4(b)为吹风稳定阶段,由于气动光学效应得到的模糊图像。点目标外面的轮廓线为图像分割后的物体目标,详见 2.2.3 节。

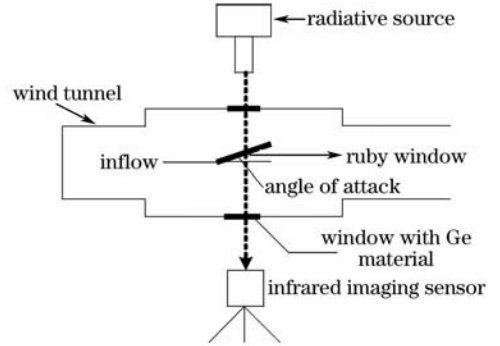


图3 气动光学试验原理图

Fig.3 Setup of the wind-tunnel experiment

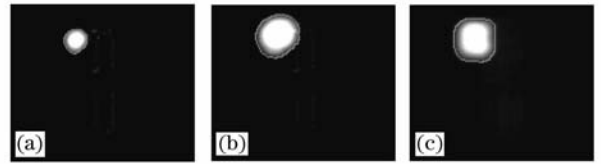


图4 吹风前后图像及理论计算的模糊图像

Fig.4 Experimental measured and theoretical aero-optically blurred images

### 2.2.2 气动光学效应对应的图像退化模型

若平流流场及湍流脉动的气动光学效应的传递函数频域分别表示为  $H_1(u, v)$  和  $H_2(u, v)$ , 其空域表示分别为  $h_1(x, y)$  和  $h_2(x, y)$ , 则由气动光学效应所引起的图像退化模型可表示为

$$g(x, y) = f(x, y) \times h_1(x, y) \times h_2(x, y) + n(x, y), \quad (10)$$

频域中表示为

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot H(u, v) + N(u, v), \quad (11)$$

其中  $f(x, y)$  为原始图像,  $g(x, y)$  为湍流退化图像。综合的气动光学传递函数为

$$H(u, v) = H_1(u, v)H_2(u, v). \quad (12)$$

若已知  $h_1(x, y)$  和  $h_2(x, y)$ , 则可以由吹风前的原始图像  $f(x, y)$  得到模糊退化图像。

### 2.2.3 气动光学效应光学传递函数的实验验证

为验证点扩散函数的正确性,将本文及文献[8]计算出来的点扩散函数和吹风前的图像作卷积,得到模糊图像如图 4(c)所示。由于图像的目标和背景比较简单,对理论图像和实际图像进行基于 OTSU 方法的图像分割,阈值灰度为 20,提取目标及其轮廓线,计算得到的目标周长和直径数据及各

目标的最大灰度值如表 1 所示。

表 1 吹风前和吹风后模糊图像及理论模糊图像参数统计

Table 1 Figures-of-merit (FOMs) of the experimentally measured and theoretical images

FOMs	perimeter /pixel	Diameter /pixel	Max gray value /gray value
7(a)	55	17	223
7(b)	106	32	255
7(c)	118	31	218

从表 1 可以看出,在当前飞行参数下,实际吹风后的图像面积约扩散为原始图像的 4 倍,而理论计算得到的模糊图像和实际采集到的气动模糊图像的周长和直径均很接近。计算图 4(b)和 4(c)的相关系数为 0.93,反映了两图的相似程度。此外,实验气动模糊图像中心处比理论计算的模糊图像要亮。这是因为吹风后,由于气动热使目标温度更高,从而使红外成像更亮。以上结果对比证明了理论计算得到气动光学点扩散函数的有效性。下面将针对气动模糊图像,采取不同的图像复原方法进行校正。

### 3 气动模糊图像复原研究

由于气动光学效应校正实时性要求高,要求图像复原算法简单,快捷且能稳定收敛。由于迭代算法具有简单、易于用硬件实现等特点,本文中采用迭代算法对图像进行复原。

#### 3.1 基本迭代算法

设  $\hat{f}_k$  为第  $k$  次迭代后得到的对清晰图像  $f$  的估计值,  $g$  为降质模糊图像,  $\mathbf{H}$  为降质系统函数。基本迭代算法有 Van Cittert 迭代算法和 Landweber 迭代算法<sup>[13]</sup>。基于 Van Cittert 迭代算法的图像复原公式为

$$\begin{aligned} \hat{f}_0 &= \beta g, \\ \hat{f}_{k+1} &= \hat{f}_k + \beta \cdot (g - \mathbf{H}\hat{f}_k) = \beta g + (I - \beta\mathbf{H})\hat{f}_k. \end{aligned} \quad (13)$$

基于 Landweber 迭代算法的气动模糊图像复原迭代格式为

$$\begin{aligned} \hat{f}_0 &= g, \\ \hat{f}_{k+1} &= \hat{f}_k + \beta\mathbf{H}^* (g - \mathbf{H}\hat{f}_k), \end{aligned} \quad (14)$$

此处  $\mathbf{H}^*$  为  $\mathbf{H}$  的共轭转置矩阵,参数  $\beta$  为松弛迭代因子,一般为一个预先给定的值,且满足  $0 < |1 - \beta\lambda_{\max}^2| < 1$ ,这里  $\lambda_{\max}^2$  为点扩散函数矩阵  $\vec{H}$  的最大奇异值。Van-Cittert 算法具有收敛快速的优点,但复原效果不理想,Landweber 算法的收敛速度由参数  $\beta$  确定。

$\beta$  小,收敛速度慢,但若  $\beta$  太大,虽然加快了收敛速度,但迭代过程的不稳定性及发散的可能性会增加。对于参数  $\beta$  的选择和正确更新是一个值得研究的问题<sup>[14]</sup>。

#### 3.2 基于自适应参数选择的 Landweber 迭代算法

提出一个自适应选择  $\beta$  的改进 Landweber 迭代算法。在该方法中,参数  $\beta$  能自适应地随着迭代次数增加而调整。主要算法描述如下:对于模糊降质图像  $g$ ,设第  $k$  次迭代得到的  $\hat{f}_k$ ,其梯度矢量为  $[\partial\hat{f}_k/\partial x, \partial\hat{f}_k/\partial y]$ ,梯度幅度为

$$\text{grad}(\hat{f}_k) = \sqrt{\left(\frac{\partial\hat{f}_k}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\hat{f}_k}{\partial y}\right)^2}. \quad (15)$$

$$\text{令} \quad \beta_k = \frac{\int_x \int_y \text{grad}\hat{f}_k}{\int_x \int_y \text{grad}\hat{f}_{k-1}}, \quad (16)$$

终止迭代的条件为  $\frac{\|f_{k+1} - f_k\|}{\|f_k\|} \leq \text{Thresh}$ 。本文中 Thresh 取  $10^{-6}$ 。由于该算法将图像的梯度考虑进来,而图像的梯度大小一定程度上反映了复原图像的复原效果。在迭代开始时,一般有  $\beta_k \geq \beta_{k-1}$ ,即松弛迭代因子能自适应地随着迭代次数增加而增加,加快了收敛速度;而当迭代趋于收敛时,  $\beta_k$  会趋于稳定,保证了收敛的稳定性。

改进后的 Landweber 迭代算法的伪代码如下:

---

```

Step1: 初始化参数  $\beta, \hat{f}_0 = g$ , 迭代循环最大次数  $M$ ;
Step2:  $\hat{f}_1 = \hat{f}_0 + \beta_0 \mathbf{H}^* (g - \mathbf{H}\hat{f}_0)$ ;
Step3: 迭代过程:
    FOR  $k = 2 : M$ 
         $\hat{f}_k = \hat{f}_{k-1} + \beta_{k-1} \mathbf{H}^* (g - \mathbf{H}\hat{f}_{k-1})$ ;
        IF  $\text{grad} \hat{f}_{k-1} \neq 0$  AND  $0 < |1 - \beta\lambda_{\max}^2| < 1$ 
             $\beta_k = \frac{\int_x \int_y \text{grad} \hat{f}_k}{\int_x \int_y \text{grad} \hat{f}_{k-1}}$ 
        ELSE
             $\beta_k = \beta_{k-1}$ 
        END IF
        IF  $\frac{\|f_{k+1} - f_k\|^2}{\|f_k\|^2} \leq \text{Thresh}$ 
            BREAK;
        END IF
    END FOR

```

---

### 4 实验结果与分析

图 5(a)和图 6(a)为红外地面目标图像,图 5(b)和图 6(b) 用计算得到的气动光学效应点扩散函数对其进行模糊后的复原的结果。图(c),(d),(e)分别为使用 Van-citter, Landweber 和改进的 Landweber 算法得到的复原结果。

定义改进信噪比为

$$ISNR = 10\lg \left\{ \frac{\int \int_x \int_y [g(x,y) - f(x,y)]^2}{[\int f(x,y) - f(x,y)]} \right\} \quad (17)$$

表 2 为各算法在计算收敛时的循环次数。表 3 为各图的改进信噪比。为测试本文图像复原迭代算法的通用性,对一幅 Matlab 图像工具箱中的可见光图像,进行 5×5 均值模糊后,采取不同算法复原。图 7 为原始图像、模糊图像及复原结果,改进信噪比及迭代次数见表 2 和表 3。由实验结果可见, Van-Citter 算法收敛较快,但复原效果最差, Landweber 算法收敛速度较慢,且存在明显的振铃现象,本文提出

的算法具有较快的收敛速度和较好的复原效果。

表 2 三种复原算法在计算达到收敛时循环次数

Table 2 Convergence of different methods

Method	Van-Citter	Traditional	Adaptive
		Landweber	Landweber
Fig 7	35	89	21
Fig 8	32	78	22
Fig 9	25	58	17

表 3 复原图像的改进信噪比

Table 3 ISNR of the restored images

Image	5(c)	5(d)	5(e)
ISNR(dB)	1.23	1.67	2.32
Image	6(c)	6(d)	6(e)
ISNR(dB)	1.83	2.79	3.46
Image	7(c)	7(d)	7(e)
ISNR(dB)	2.07	1.23	3.42

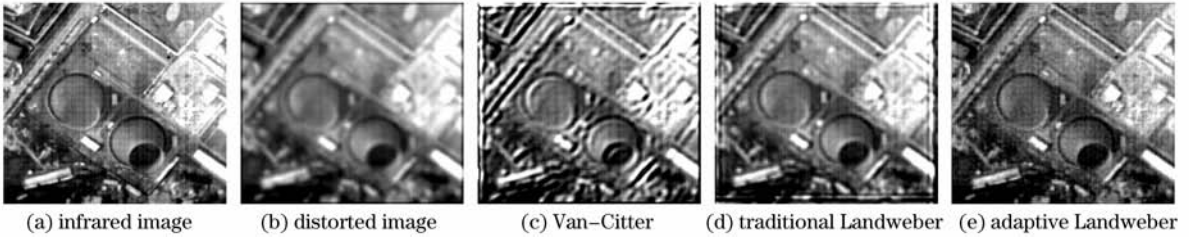


图 5 红外图像及复原图像

Fig. 5 Comparison of results on an infra-red image

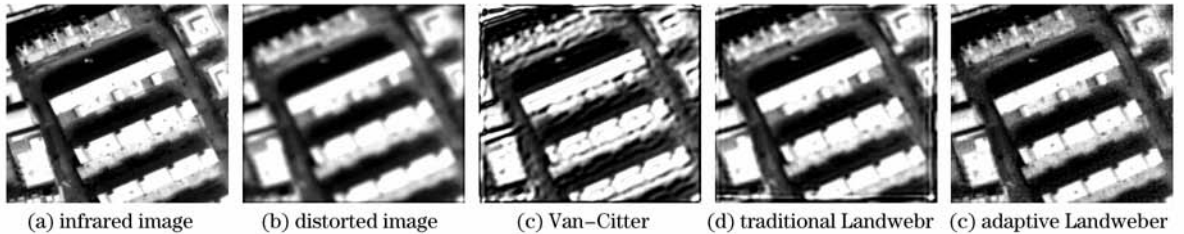


图 6 红外图像及复原图像

Fig. 6 Comparison of results on another infra-red image

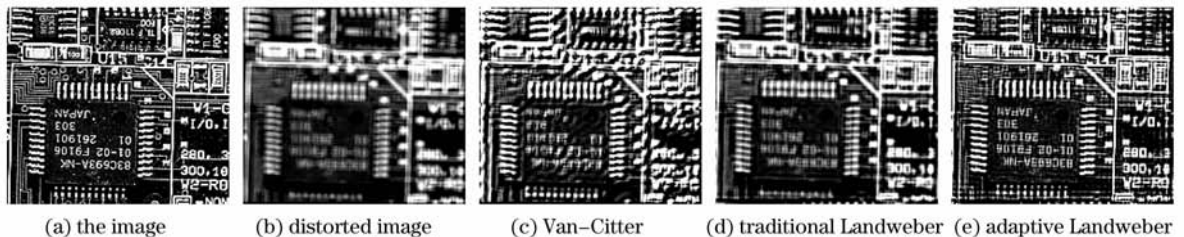


图 7 可见光图像及复原图像

Fig. 7 Comparison of results on a general image

## 5 结 论

气动光学及其校正技术研究是红外寻的与制导的关键问题。通过理论分析与计算,将气动光学效应表示为图像降质系统的点扩展函数,并验证了其正确性。在实际红外成像飞行中,得到的是气动模糊图像。因此,可以在飞行实验之前,先对不同飞行参数下的气动光学效应点扩展函数进行数值仿真,得到它们对成像的大致影响程度,从而使飞行实验更有针对性。同时,在飞行实验得到气动模糊图像后,可以有针对性地利用降质函数已知的图像恢复算法,来实现对气动模糊图像的有效恢复。对于气动光学效应及红外制导的相关研究都具有重要的意义。此外,本文提出的图像复原迭代算法不仅可以用于红外图像的复原,也可以用于一般的可见光图像的复原中。

## 参 考 文 献

- 1 E. J. Jumper, E. J. Fitzgerald. Recent advances in aero-optics [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2001, **37**:299~339
- 2 Xie Wenke, Jiang Zongfu. Proper orthogonal decomposition and low dimensional approximation of aero-optical aberrated wavefronts[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 491~495  
谢文科,姜宗福. 气动光学畸变播迁的本征正交分解和低阶近似[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 491~495
- 3 Li Yanfang, Han zhiping, Yin xingliang. Control of turbulence in correction of aero-optics effects [J]. *Modern Defence Technology*, 2005, **33**(1):32~35  
李艳芳,韩志平,殷兴良. 气动光学效应校正中湍流流场控制方法[J]. *现代防御技术*, 2005, **33**(1):32~35
- 4 Guo Longde. The investigation on the AO effect ground simulation test and instrumentation of the high speed interceptor [D]. *Sichuan: Sichuan University*, 2004  
郭隆德. 高速拦截弹气动光学效应地面模拟测试研究[D]. 四川: 四川大学, 2004
- 5 R. R. Smith, C. R. Truman Prediction of optical phase degradation using a turbulent transport equation for the variance of index-of-refraction fluctuations[J]. *AIAA -90-0250*:1~13
- 6 Liu Chunsheng, Lu Xiaofen, Hong Hanyu *et al.* . Investigation on the correction method of distorted image caused by aero-optic effects based on matching of feature points [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, **28**(10):1468~1469  
刘纯胜, 卢晓芬, 洪汉玉 等. 基于特征点配准的气动光学图像校正方法研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2006, **28**(10):1468~1469
- 7 Huang Jianming, Shen Mangzuo. Multiframe blind deconvolution restoration of atmospheric turbulence-degraded images based on noise characteristic[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1686~1690  
黄建明,沈忙作. 基于噪声特性的大气湍流退化图像多帧盲反卷积复原[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1686~1690
- 8 Yang Wenxia, Cai Chao, Ding Mingyue *et al.* . Numerical analysis of aero-optic effects induced by the turbulence field surrounding hypersonic aircrafts [C]. Wuhan, *SPIE*, 2007, **6786**:67865D-1~67865D-8
- 9 R. Clark, M. Banish, J. Hammer. Fundamentals of aero-optic phenomena[C]. *AIAA -94-2545. 18<sup>th</sup> AIAA Aerospace Ground Testing Conference*. 1994:20~23
- 10 J. E. Pond, G. W. Sutton. Aero-optic performance of an aircraft forward-facing optical turret[J]. *Journal of Aircraft*, 2006, **43**(3):600~607
- 11 G. W. Sutton. Aero-optical foundations and applications [J]. *AIAA Journal*, 1985, **3**(10):1525~1537
- 12 G. W. Sutton, J. E. Pond, R. Snow *et al.* . Hypersonic interceptor aero-optics performance predictions [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1994, **31**(4):592~598
- 13 R. B. Mark, K. K. Aggelosk. Digital image restoration [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1997, **1053**(3):24-41
- 14 Liang L., Xu Y. C. Adaptive Landweber method to deblur images [J]. *IEEE signal processing letters*, 2003, **10**(3):129~132