

## 大气湍流模糊图像的高分辨力复原算法

李思雯, 徐超, 刘广荣, 金伟其

(北京理工大学光电学院“光电成像技术与系统”教育部重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 大气湍流是大气中的一种重要运动形式, 它的存在使大气中的动量、热量、水气和污染物的垂直和水平交换作用明显增强, 这种干扰作用极大地影响了光电成像系统对于目标的分辨能力。由于湍流影响而退化的图像中同时存在着“幸运区域”, 用适当的算法可以获得高分辨力复原图像。为了获取包含“幸运区域”的大气湍流模糊图像, 在实验室使用人造湍流, 并结合短曝光技术拍摄了大气湍流干扰的序列图像。文中应用矩形交叠分块方法, 改进了基于偏微分方程(PDE's)的序列图像复原算法, 对获取的序列短曝光图像进行处理。结果表明, 经该算法处理得到的合成图像质量有明显的提升, 该算法对大气湍流造成的图像质量退化有较好的复原作用。

**关键词:** 大气湍流; 去模糊; 幸运区域; 短曝光

**中图分类号:** O439   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3486-05

## High resolution restoration algorithm of atmospheric turbulence blurred image

Li Siwen, Xu Chao, Liu Guangrong, Jin Weiqi

(Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Key Laboratory of Photoelectric, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Atmospheric turbulence is an important form of movement in the atmosphere, which makes the vertical and horizontal's exchange interaction of momentum, heat, water vapor and pollutants significantly enhanced, and this interference has a great impact on the target resolution of optical imaging system. There also have "lucky regions" in the degraded images because of turbulence, so the appropriate algorithm can obtain high resolution restored image. To obtain the atmospheric turbulence blurred images which contains "lucky regions", the artificial turbulence was used in the laboratory and combined with the short-exposure technique to take a serial of atmospheric turbulence blurred images. The rectangle overlapped partition method was used and the image restoration algorithm was improved based on nonlinear partial-derivative equations (PDE's), to process the obtained short exposure serial images. The results show that, the image quality of the composite image is improved obviously, this algorithm has great restoration effect on images' quality degradation caused by atmospheric turbulence.

**Key words:** atmospheric disturbance; deblurring; lucky region; short exposure

收稿日期: 2013-03-03; 修订日期: 2013-04-06

基金项目: 兵器预研支撑基金(62201070116); 微光夜视技术重点实验室基金(J20110501)

作者简介: 李思雯(1986-), 女, 硕士生, 主要从事图像处理方面的研究。Email: lisiwen1016@163.com

导师简介: 徐超(1979-), 男, 讲师, 主要从事光电图像处理和光电成像技术与系统方面的研究。Email: rockyxu@bit.edu.cn

## 0 引言

大气湍流是大气中的一种重要运动形式,其作用远大于分子运动的交换强度,对光波、声波和电磁波在大气中的传播产生一定的干扰作用。在天文观测、宇宙航天、战场观测、精确制导、恶劣环境下的地面观测等实际应用中,大气湍流干扰将极大地影响光电成像系统对于目标的分辨能力。

实验表明,大气湍流影响正常成像过程,如果把大气湍流考虑到成像系统中,利用大气湍流的微透镜(Micro-lensing)效应,场景的局部区域在某些情况下,可以获得接近原有系统衍射限的成像性能。

1977年D. L. Fried论述了一定条件下,获得某部分成像质量接近衍射极限的短曝光图像的概率<sup>[1]</sup>,并在1982年研究了大气湍流的非等晕现象<sup>[2]</sup>。在此工作基础上,1997-1999年Mikhail A. Vorontsov<sup>[3-4]</sup>通过实验验证了,所有因湍流影响而退化的图像中都存在着“幸运区域”(Luck Region),对退化的序列图像进行特定的处理,可以重建高分辨力的目标场景图像,且可能获得接近原有成像系统衍射限的分辨力,并使用基于偏微分方程(PDE's)的图像复原算法重建了高分辨力图像。2003年,Thomas J. Karr在DARPA的支持下,研究了大气湍流所产生的微透镜现象,并分析了在此情况下如何进行图像重建。其后,根据剑桥大学的网站资料,Sijiong Zhang等研究了地面远距离的非等晕幸运成像技术,应用幸运成像技术对模糊英文文字成像达到可辨认的效果。根据2009年DARPA网站公开的资料,Super-Resolution Vision System(SRVS)项目针对地面观测,应用多帧序列短曝光图像重建了高分辨力图像。2009年Mikhail A. Vorontsov等对高分辨力图像融合技术提出了改进<sup>[5]</sup>,实现自动化分析源数据并得出融合核大小,成功地受大气湍流影响的视频流实现了自动图像融合。

在国内,2005年华中科技大学对红外目标的湍流退化图像的复原算法进行了研究<sup>[6]</sup>,取得了一定的效果。2009年华中科技大学卢晓芬等人针对气动光学引起的像素偏移问题提出了一种基于特征点配准的校正方法<sup>[7]</sup>。2008-2010年国防科学技术大学对获取“幸运图像”的概率进行了研究,基于剑桥大学“幸运

成像”理论,使用交叠分块的分区方法,对恒星、星对以及近地扩展目标分别进行了研究,提高了光学系统成像分辨力<sup>[8-9]</sup>。

文中将在原有偏微分方程(PDE's)的序列图像复原算法基础上进行改进,结合矩形交叠分块的分区方法,对获取的多帧大气湍流短曝光图像进行复原处理,以期对大气湍流产生的模糊有一定的复原作用,并获得运算速度上的提升。

## 1 基于偏微分方程的图像复原算法原理

短曝光图像可以获得包含“幸运区域”的图像,使用适当的算法选出这些区域并构成一个子集,通过这个子集可望重建高分辨力输出图像<sup>[2,10]</sup>。对于短曝光图像中“幸运区域”出现的概率问题,最早由Hufnagel<sup>[11]</sup>提出,Fried经过仿真研究得出:在 $D/r_0 \geq 3.5$ 时,“幸运区域”出现的概率<sup>[1]</sup>为:

$$\text{prob} \approx 5.6 \exp[-0.1557(D/r_0)] \quad (1)$$

式中: $D$ 为成像孔径; $r_0$ 为相干长度。

此后,Cortegian<sup>[12]</sup>在Fried工作基础上,添加两个约束条件,得出 $D/r_0$ 在所有范围内,“幸运区域”出现的概率的对数表达式为:

$$\log(\text{prob}) = \frac{-0.1557(D/r_0)}{\exp\{11.104/(D/r_0)^2 + 35.35/[19.907 + (D/r_0)^2]\}} \quad (2)$$

地面观测的目标成像是处于非等晕的窗口中,而非等晕窗口是由不同的等晕窗口组成的,可以对等晕窗口大小的估算,对图像进行分块处理,使得图像的某一部分是处于等晕窗口中。处于等晕窗口中的目标信息受大气湍流的扰动影响基本一致,除了图像闪烁和运动模糊的特点之外,相对于衍射极限成像只存在位置上的偏移。对每一个子区域进行像质评价,选取质量好的区块并拼接,可以显著提高该区域的成像分辨力和图像信噪比。

为了将包含好图像的区域识别出来,借鉴参考文献[4]采用的区域图像评价函数——边缘指示函数 $J$

$$J(r) = \int_{\Omega} [I_a(r') - I_0(r')] F(r' - r, a) dr' \quad (3)$$

式中: $I_0$ 是未失真图像; $F(r, a) = \exp[-r^2/a^2]$ , $\Omega$ 为位置矢量 $r$ 处的积分区域;另外,有 $I_a(r, t) \cong I_0(r)[1 - \mu L/(kb^2) \nabla^2 I(r)]$ , $\mu$ 是控制相位调制的常数, $k = 2\pi/\lambda$ , $b$ 是输入图像的像素值, $\nabla^2$ 为拉普拉斯算子, $I(r)$ 是输入图像。由公式(3)得到 $J$ 函数的近似表达式:

$$J(\mathbf{r}) = \kappa \int_{\Omega} |\nabla^2 I(\mathbf{r}')| F(\mathbf{r}' - \mathbf{r}, a) d\mathbf{r}' \quad (4)$$

其中  $\kappa = I_0(\mathbf{r}) \mu L / (kb^2)$ 。

上式的优势在于不用直接计算空间导数就可得到图像边缘特征。但是和参考文献[4]中  $\Omega$  采用随机圆形区域搜索方法不同,文中采用固定变长为  $a$  的矩形交叠分块方法,该方法可以简化算法,减少计算量,而由于分块间有重叠部分,故分块痕迹也不明显,可获得较好的复原效果。

分别求初始帧  $F(\mathbf{r}, t)$  和输入帧  $I(\mathbf{r}, t_n)$  的  $J$  参数,得到各向异性增益函数定义:

$$\delta(\mathbf{r}, t) = \begin{cases} J(\mathbf{r}, t) - J^s(\mathbf{r}, t) & \text{当 } J(\mathbf{r}, t) > J^s(\mathbf{r}, t) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

对图像进行像质评价后,解偏微分方程,得到输出的数据流  $F(\mathbf{r}, t)$ ,

$$\tau \frac{\partial F(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = -\beta \delta(\mathbf{r}, t) [F(\mathbf{r}, t) - I(\mathbf{r}, t_n)] \quad (6)$$

式中:  $\tau$  和  $\beta$  为常数,  $t_n \leq t \leq t_{n+1}$ , 第一帧短曝光图像  $I(\mathbf{r}, t_0)$  作为初始条件。使用数值方法解偏微分方程,结果为:

$$I_{n+1}^s(\mathbf{r}, t) = I_n^s(\mathbf{r}, t) - \frac{\Delta t \cdot \beta \cdot \delta(\mathbf{r}, t)}{\tau} [F(\mathbf{r}, t) - I(\mathbf{r}, t_n)] \quad (7)$$

由解出  $I_{n+1}^s(\mathbf{r}, t)$  作为新的初始帧,接着和下一帧输入图像进行对比,循环进行以上的步骤,在图像数量足够多的情况下,可以很好地复原图像。算法流程如图 1 所示。

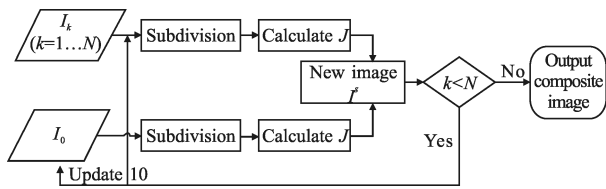


图 1 算法流程图

Fig.1 Algorithm flowchart

## 2 大气湍流模拟实验设置

根据以上算法原理,首先需要获得数量足够的包含“幸运区域”的大气湍流短曝光图像,通过计算这些序列图像的  $J$  参数,选择出“幸运区域”进而复原湍流图像。故搭建如图 2 所示的模拟大气湍流的实验系统。为了模拟大气湍流,使用两个户外火炉产生湍流,使用 220 g 罐装丁烷气产生火焰;由于短曝光图像

对曝光时间有一定要求,故实验使用 MotionBLITZ Cube5 相机,该相机使用高速 CMOS 传感器,帧速为 28~5 000 fps,实验中设置帧频为 200 frame/s,曝光时间为 4 997 s,满足短曝光的要求,可以获得包含“幸运区域”的湍流图像;另外由于在室内进行实验,使用玩具模型搭建场景,该场景较小,故选择尼康 20~85 mm 变焦镜头,实验中调节镜头焦距为 70 mm。玩具模型数个作为目标物,第一个目标物距离相机 1.9 m,距相机 1 m 处放置第一个火炉,共放置两个火炉,以保证湍流运动的无序性。相机的参数选择如表 1 所示。

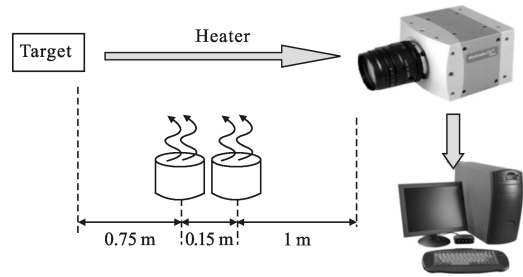


图 2 大气湍流短曝光图像采集实验示意图

Fig.2 Experimental schematic diagram of atmospheric turbulence short exposure images' acquisition

表 1 实验系统的主要参数参数

Tab.1 Main parameters of experiment system

Pixel	/frame · s <sup>-1</sup>	Exposure time/μs	Focal length /mm	$F$
256×256	200	4 997	70	2.8

用以上实验装置,获得了 1 500 帧大气湍流短曝光模糊图像,图 3(a)为原始未加湍流图像,图 3(b)~(d)为加入湍流后拍摄的短曝光序列图像。由于相机聚焦在最前方的小人处,故后方的物体均为模糊状态。可以看到,加入湍流后,由于湍流的影响,图像某些部分存在扭曲、重影现象,但同时,有的模糊部位清晰度比原始图像更好,如图 3(b)~(d)中的实线、虚线、点线三个框图所标示部位分别对应图 3(a)中相同模糊部位,可以看到,大气湍流序列图像的框图部分比对应的原始无湍流图像的框图部分更加清晰。从这点可以说明大气湍流的微透镜效应确实存在,而利用短曝光可以获得包含这些“幸运区域”的图像。

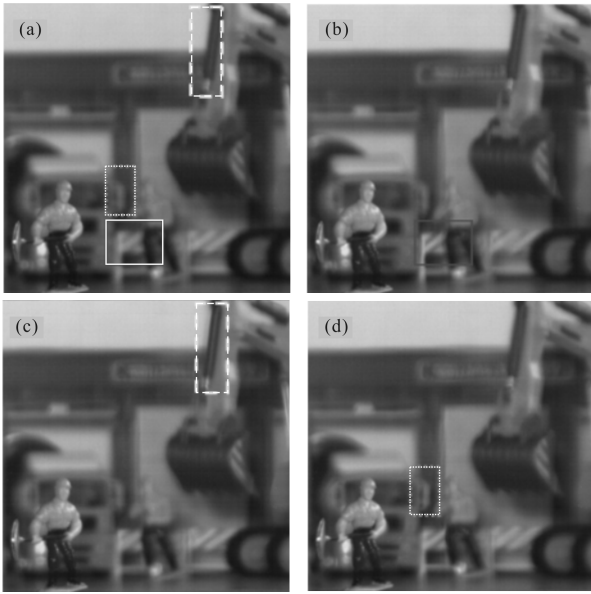


图 3 无湍流图像和包含“幸运区域”的短曝光图像  
Fig.3 Images without turbulence and short exposure images contains "lucky region"

### 3 算法处理结果

按照如图1所示的算法流程图,对采集的大气湍流模糊序列图像进行 Matlab 编程处理。为了和文中算法进行对比,同时使用多帧图像的帧积分和单帧图像的拉普拉斯增强算法对湍流图像进行处理。图 4 给出了湍流图像序列及其处理效果比较,其中图 4(a)为湍流图像序列之一,图 4(b)为 1000 帧湍

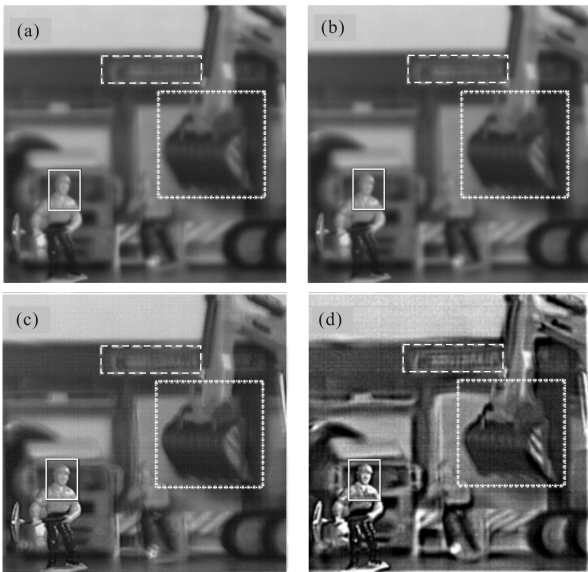


图 4 算法处理结果  
Fig.4 Results of algorithm processing

流图像帧积分结果,图 4(c)为选用拉普拉斯算子为  $[0 \ 1 \ 0; 1 \ -4 \ 1; 0 \ 1 \ 1]$  的拉普拉斯增强算法对单帧湍流图像进行处理的结果。图 4(d)为文中算法对 100 帧大气湍流序列图像的处理结果。

可以看出,帧积分实际上等效于长曝光,因此长曝光图像中不包含“幸运区域”,其图像质量比短曝光图像有所降低;使用拉普拉斯增强算法,湍流造成的扭曲变形也被增强,处理后图像的重影更明显;文中算法由于采用了 100 帧图像进行处理,由于包含多个“幸运区域”,因此,原来模糊的部分经过算法处理都变得较为清晰,细节增多(如前方人偶的脸部以及车库上的文字),且对比拉普拉斯增强算法,其边缘更加锐利(如挖土机吊臂轮廓),故文中算法能获得更好的复原效果。

为了客观地评价各图像的质量,采用  $J$  参数、增强效果评价指标 (Evaluation of Enhancement, EME) 和平均梯度作为客观评价参数进行了图像质量评价。 $J$  参数作为文中算法的核心评价函数,可评价图像的边缘特征, $J$  的值越大,说明图像边缘信息越丰富,图像质量越好。在评价图像质量时定义其积分区域为整个图像范围。

EME 评价指标是由德州大学 Agaian 等于 2007 年提出的<sup>[13]</sup>,其通过计算图像局域中最大和最小值相除结果的对数均值作为客观评价结果,其评价方法如公式(8)所示:

$$EME = \frac{1}{k_1 k_2} \sum_{l=1}^{k_2} \sum_{i=1}^{k_1} 20 \ln \left( \frac{f_{\max; k, l}}{f_{\min; k, l} + c} \right) \quad (8)$$

式中: $k_1$  和  $k_2$  分别表示水平方向和垂直方向分割的图像子块数量; $f_{\max; k, l}$  和  $f_{\min; k, l}$  表示  $(k, l)$  图像子块的最大和最小值; $c$  为一个极小的常数,避免分母为零。EME 的物理意义反映出图像局域灰度的变化程度。EME 数值越大,则说明图像的细节纹理越丰富,对比度越好。

平均梯度定义如公式(9)所示,反映了图像微小细节反差变化的速率,即图像多维方向上密度变化的速率,表征图像的相对清晰程度。平均梯度越大,图像层次越多也就越清晰。 $f(i, j)$  为图像在  $(i, j)$  处的灰度值。

$$\bar{G} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \times \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{[f(i, j) - f(i+1, j)]^2 + [f(i, j) - f(i, j+1)]^2}{2}} \quad (9)$$



表 2 给出各图像的客观评价结果。可以看出： $J$ 、 $EME$  和  $\bar{G}$  的评价值变化规律是一致的；帧积分的评价参数值比原始湍流图像的评价值低，与主观判断一致，这是因为帧积分使图像的清晰区域和模糊区域叠加，降低了图像的清晰度。文中算法处理图像的  $J$ 、 $EME$  和  $\bar{G}$  值都有明显的提升，大于拉普拉斯增强算法的评价参数值，即评价参数也表明文中算法能提高图像的分辨力，改善系统的成像质量。此结论和主观评价结论一致。

表 2 像质评价参数

Tab.2 Image quality evaluation parameters

	Turbulence image	Frame integral	Laplace enhancement	Proposed algorithm
$J$	73.774 1	69.539 7	1 349.5	2 454.3
$EME$	11.698 3	11.093 8	19.170 7	37.988 4
$\bar{G}$	0.017 3	0.016 0	0.056 8	0.079 5

#### 4 结束语

文中采用矩形交叠分块的分区方法，改进了基于偏微分方程(PDE's)的序列图像复原算法，对实际采集的大气湍流短曝光模糊序列图像进行了复原处理，取得了较明显的复原效果。虽然由于无法获得国外论文的实验数据，难以与之进行直接的定量比较，但仅就文中算法处理结果进行的主观、客观评价分析表明，文中算法能有效选取大气湍流短曝光图像序列中的“幸运区域”，在一定程度上去除由湍流引起的模糊并矫正图像扭曲，复原图像的细节明显增多且有增强，可提高图像分辨力，改善系统的成像质量。

由于实验是在室内进行，短曝光成像造成曝光量稍有不足，故在处理过程中增强了图像噪声，后续可以通过优化短曝光成像系统设计来降低噪声。由于采用了固定的矩形分区方法，文中算法在速度上有一定优势，用 Matlab 软件处理 100 帧图像需要时间 10 s 左右，未来在硬件上实现也有很好的前景。

#### 参考文献：

[1] Fried D L. Probability of getting a lucky short-exposure

image through turbulence[J]. *Opt Soc*, 1978, 68: 1651–1657.

[2] Fried D L. Anisoplanatism in adaptive optics [J]. *Opt Soc*, 1982, 72: 52–61.

[3] Vorontsov M A, Carhart G W, Pruidze D V, et al. Adaptive imaging system for phase distorted extended source and multiple-distance objects [J]. *Appl Opt*, 1997, 36: 3319–3328.

[4] Vorontsov M A. Parallel image processing based on an evolution equation with anisotropic gain [J]. *Integrated optoelectronic architectures Opt Soc*, 1999, 16: 1623–1637.

[5] Mathieu Aubailly, Mikhail A Vorontsov, Gary W Carhart, et al. Automated video enhancement from a stream of atmospherically-distorted images: the lucky-region fusion approach [C]//SPIE, 2009, 7463: 74630C–74630C–10.

[6] Hong Hanyu, Zhang Tianxu, Yi Xinjian. Optimized restoration algorithm of infrared sequence degraded images with aero-optical effects[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(6): 724–728. (in Chinese)

[7] Lu Xiaofen, Zhang Tianxu, Hong Hanyu. Image correction method with pixel deviation caused by aero-optics effects [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 758–761. (in Chinese)

[8] Bao Jianghong. The experimental study on lucky imaging technology [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 10. (in Chinese)

[9] Yang Zhongliang, Liu Qiang, Ren Chenggang. Probability of getting anisoplanatic lucky short-exposure images [J]. *Infrared and laser Engineering*, 2010, 40(10): 2042–2047. (in Chinese)

[10] Welsh B M, Gardner C S. Effects of turbulence induced anisoplanatism on the imaging performance of adaptive astronomical telescopes using laser guide stars [J]. *Opt Soc*, 1991(8): 69–80.

[11] Hufnagel R E. Restoration of atmospherically degraded images [C]. Washington D C: National Academy of Sciences, 1966.

[12] Corteggiani J P, Gay J, Rabbia Y. Probability of diffraction limited images in infrared through turbulence—experimental results [C]//European Southern Observatory, Conference on Scientific Importance of High Angular Resolution at Infrared and Optical Wavelengths, 1981.

[13] Sos S Agaian, Karen A Panetta, Grigoryan A. Transform-based image enhancement algorithms with performance measure [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2001, 10(3): 367–382.