

基于 APEX 方法的光电退化图像改进复原算法

胡文军 马德宝 王 锋

(解放军信息工程大学, 河南 郑州 450002)

摘要 APEX 方法是一种非迭代式的点扩展函数(PSF)估计方法,适用于实时性要求较高的场合,但其估计出的 PSF 在有限支持域内不能保证退化过程能量守恒。在 APEX 方法的基础上,针对光电图像的退化特征,在估计 PSF 时加入非负限制和归一化处理,并对 APEX 方法中的近似常数 A 和频域中心区域 Ω 的选取加以改进,增强了其实用性。最后用慢演化连续边界(SECB)方法重构复原图像,同时就 SECB 方法中的两个重构因子 K 和 s 的选取给出参考结论。通过仿真,验证了改进算法不仅增强了稳定性,而且复原效果也有较大改进。

关键词 大气光学; 点扩展函数估计; APEX 方法; 慢演化连续边界方法

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200929s1.0057

The Improved Restoration Algorithm for Opto-Electronic Degraded Image Utilizing APEX Method

Hu Wenjun Ma Debao Wang Feng

(People's Liberation Army Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract APEX method is a kind of non-iterative restoration approach, can be applicable to some real-time situation. There is a problem that its result point spread function (PSF) can not be sure energy is conversation in finite support area. The PSF was restrained non-minus and linear unitary based on the APEX method, pointing to the degradation character of opto-electronic image, and the approximate constant A and frequency center domain Ω was improved. At last, reconstruct the restoration image utilizing slow evolution of continuation boundary (SECB) method, give the reference conclusion for how to select the reconstruction factor K and s . The simulation indicates the improved algorithm enhanced its stability, the effect of restoration also has been improved.

Key words atmospheric optics; point spread function (PSF) estimation; APEX method; slow evolution of continuation boundary (SECB) method

1 引 言

在利用光电望远镜进行空间目标监视与探测的过程中,常常因为大气湍流的扰动造成目标图像质量的下降^[1,2],导致目标图像的模糊。图像盲复原技术因其实用性强,操作简单,对已知条件依赖性弱的优点,在复原此类模糊图像时得到广泛应用。

图像盲复原是指在图像退化系统的点扩展函数(PSF)未知的情况下,通过一些点扩展函数和目标图像的先验信息,实现目标图像的复原。现有的算法有很多种,根据算法求解的过程,大致可以分为两

类^[3-5]:一类是非迭代式算法,它将 PSF 的估计和恢复图像的过程分开,先得到 PSF 再用一种现有的图像复原算法来获得原始图像的估计;另一类是迭代式算法,它将 PSF 估计和恢复图像的过程结合起来,同时估计 PSF 和原始图像。APEX 方法就是一种非迭代式的点扩展函数求解方法,由 A. S. Carasso^[6-8]在 2001 年首先提出,但该方法得到的点扩展函数在有限支持域内不能满足单位和特性,即能量守恒,为此在 APEX 方法的基础上,针对光电图像的退化特征,加以改进,以增强其实用性和

基金项目: 军队重点计划资助课题。

作者简介: 胡文军(1985—),男,硕士研究生,主要从事光电图像处理方面的研究。E-mail: hawk1985@163.com

导师简介: 马德宝(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光电信号处理和 SAR 信号分析等方面的研究。

E-mail: debaoma1966@hotmail.com

稳定性。

2 算法原理

2.1 APEX 方法的基本原理

在实际光电望远镜成像系统中,通常将图像退化过程模型化为一个线性移不变系统,可以用下式表示

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

式中 g 为模糊图像, h 为点扩展函数, f 为目标图像, n 为噪声, “*” 为二维卷积。

利用 APEX 方法估计点扩展函数^[6,7]的一个重要应用前提就是假设被估计点扩展函数属于 G 类点扩展函数。所谓 G 类点扩展函数,就是指当点扩展函数在频域内,即光学传递函数(OTF)呈二维放射状对称且可由一个(2)式或多个(2)式的乘积表示

$$H(\xi, \eta) = \int_{R^2} h(x, y) \exp[-2\pi i(\xi x + \eta y)] dx dy = \exp[-\alpha(\xi^2 + \eta^2)^\beta], \quad (2)$$

$$\alpha > 0, 0 < \beta \leq 1$$

APEX 方法估计 G 类点扩展函数的原理就是找到一个以频域原点为中心的区域 $\Omega = \{(\xi^2 + \eta^2 \leq \omega^2)\}$, 根据模糊图像的频谱分析,估计(2)式中的参数 α, β 。

\tilde{g}, \tilde{f} 分别表示 g, f 标准化后的频谱^[9,10], 特别地当 $\eta=0$, 忽略噪声的影响, 则有

$$\ln |\tilde{g}(\xi, 0)| \approx -\alpha(\xi^2)^\beta + \ln |\tilde{f}(\xi, 0)|, \quad (3)$$

而 $\ln |\tilde{f}(\xi, 0)|$ 在实际图像系统中很难知道, 因此 APEX 方法采用了常数 A 代替, 即

$$\ln |\tilde{g}(\xi, 0)| \approx -\alpha(\xi^2)^\beta - A, \quad (4)$$

其中 A 为一正实数且 $A \in (2, 6)$ 。因此, 只要在 $|\xi| \leq \omega$ 范围内选取一些离散的 ξ_i 代入目标函数

(5)式, 采用极值搜索, 即可得出 α, β 的值

$$(\alpha, \beta) = \min_{|\xi_i| \leq \omega} \left\{ \sum_{i=1}^N [\ln |\tilde{g}(\xi_i, 0)| + \alpha(\xi_i^2)^\beta + A]^2 \right\}, \quad (5)$$

最后将 α, β 代入(2)式, 再进行傅里叶反变换即得到估计的点扩展函数。

2.2 改进的 APEX 方法

在图像退化系统中,点扩展函数必须满足非负性、单位和特性,这是为了保证在整个退化过程中能量是守恒的。APEX 方法估计 G 类点扩展函数时,将其表示成概率密度函数的形式,在 $(-\infty, +\infty)$ 满足单位和特性,但实际退化图像的支持域是有限区域,因此在点扩展函数估计的过程中必须加入非负限制和归一化处理,以保证点扩展函数在有限支持域内能量守恒,即

$$h(x, y) = \begin{cases} h(x, y), & h_{\min} \geq 0 \\ h(x, y) + |h_{\min}|, & h_{\min} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$h(x, y) = h(x, y) / \sum_{R^2} h. \quad (7)$$

参数 A 的选取在 APEX 方法中只是给出一个取值区间,需要根据一些先验条件来取定具体数值,这使得算法的稳定性和实用性减弱。通过对光电图像的特征研究,发现光电图像的背景噪声近似服从高斯分布,如图 1 所示,因此在选取有限支持域 $\Omega = \{(\xi^2 + \eta^2 \leq \omega^2)\}$ 时,可以找到这样一个区域,即不完全包含空间目标,而且在目标周围包含小部分背景,可以认为 $f(\xi, 0)$ 完全是背景信息,并不包含空间目标的信息,而这一部分信息在复原前后不会有较大变化,这样就可以用这种近高斯噪声的均值 u , 取对数 $\ln |u|$ 近似估计 $\ln |\tilde{f}(\xi, 0)|$ 。

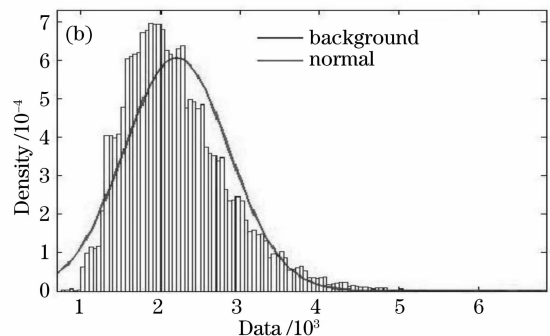


图 1 16 bit 光电图像的背景噪声统计及拟合结果

Fig. 1 Statistics and Fitting result for background noise of 16 bit opto-electronic image

2.3 慢演化连续边界法复原图像

在噪声几乎可以忽略的情况下,把用上述方法求得的 PSF 代入经典的复原算法,已经可以得到复

原图像,但实际的光电图像,不仅受到大气湍流的影响,噪声同样不能忽略,因此复原图像时必须考虑噪声的影响,本文采用慢演化连续边界(SECB)法^[8]复

原目标图像

$$F(\epsilon, \eta) = \frac{H^*(\epsilon, \eta)G(\epsilon, \eta)}{|H(\epsilon, \eta)|^2 + K^{-2}|1 - H^s(\epsilon, \eta)|^2}, \quad (8)$$

式中 $H^*(\epsilon, \eta)$ 为 $H(x, y)$ 的复数共轭, K, s 为重构因子, 均为正实数, 需要根据一些图像先验信息取定。通过实验发现选取适当的 K, s 能对增强图像局部细节, 抑制噪声起到较好作用。当 K 取得过小, 则会出现局部的亮斑, 图像也变得模糊, 如图 2 所示; 当 K 取得过大或 s 取得过小时都会放大噪声, 如图 3、图 4 所示; 而当 s 取得过大, 则(8)式分母项 $|1 - H^s(\epsilon, \eta)|^2 \rightarrow 1$ 。通过大量实验数据表明, 针对此类光电图像, 通常选取 $K \in (2, 4), s \in (8, 10)$, 如图 5。

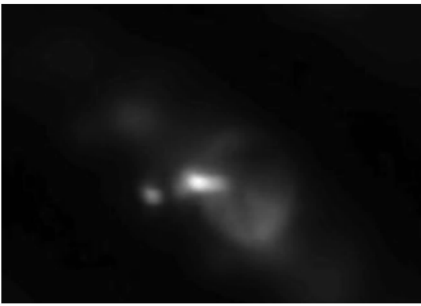


图 2 K 取得过小时($K=1$)得到的复原图像
Fig. 2 Restoration image when K is very small ($K=1$)

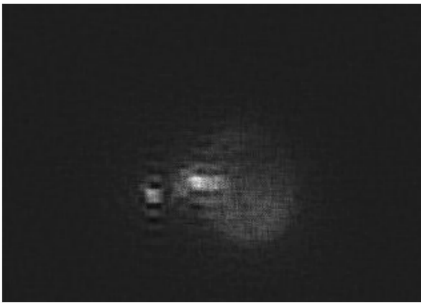


图 3 K 取得过大($K=10$)得到的复原图像
Fig. 3 Restoration image when K is very big ($K=10$)

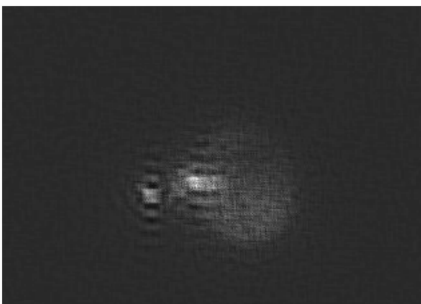


图 4 s 取得过小时($s=1$)得到的复原图像
Fig. 4 Restoration image when s is very small ($s=1$)

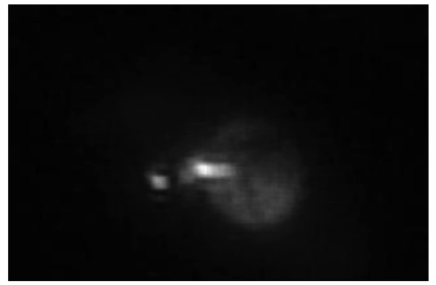


图 5 选取适当 K, s ($K=3, s=9$)得到的复原图像
Fig. 5 Restoration image when select right K and s ($K=3, s=9$)

3 实验结果

实验中选用实测空间目标光电图像(图 6), 通过与原方法复原图(图 7)进行比较, 验证本文改进

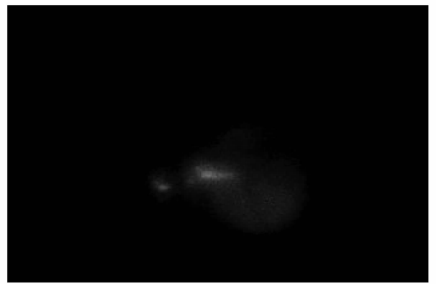


图 6 初始模糊图像
Fig. 6 Original image

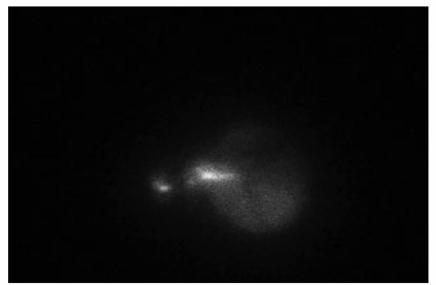


图 7 用原方法得到的复原图像
Fig. 7 Restoration image utilizing the original method



图 8 用本文改进算法得到的复原图像
Fig. 8 Restoration image utilizing the improved algorithm

算法的有效性(图 8,图 9)。

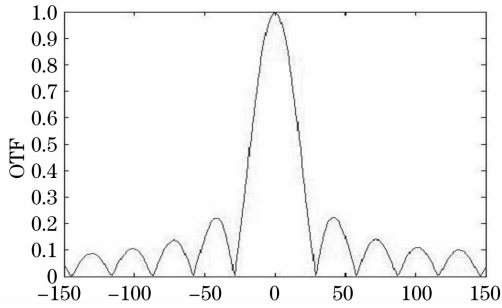


图 9 $\eta=0$ 时的光学传递函数截面图

Fig. 9 Sectional view of OTF when $\eta=0$

4 结 论

与 APEX 方法比较而言,用改进算法得到的复原图像,在图像轮廓和局部细节上都得到明显的改进,而且点扩展函数经过修正之后,依然满足放射对称性。在运算时间方面,处理一帧光电图像通常只需几秒钟,基本能满足实时性的要求,可见改进算法是可行、有效的。

参 考 文 献

- 1 H. Lanteri, C. Theys. Restoration of astrophysical Images[J]. *EURASIP J. Appl. Signal Proc.*, 2005. 2500~2513
- 2 Deepa Kundur, Dimitrios Hatzinakos. A novel blind deconvolution scheme for image restoration using recursive filtering [J]. *IEEE Trans. Signal Proc.*, 1998, **46**(2): 375~390
- 3 Deepa Kundur, Dimitrios Hatzinakos. Blind image restoration via recursive filtering using deterministic constraints [J]. *IEEE*, 1996. 2282~2286
- 4 Deepa Kundur, Dimitrios Hatzinakos. Blind image restoration via recursive filtering using deterministic constraints [J]. *IEEE*, 1996. 2282~2286
- 5 Cabir Vural, William A. Sethares. Blind deconvolution of noisy blurred images via dispersion minimization [J]. *Digital Signal Processing, IEEE*, 2002. 787~790
- 6 A. S. Carasso. Direct blind deconvolution [J]. *Soc. Ind. Appl. Math.*, 2001, **61**: 1980~2007
- 7 A. S. Carasso. APEX method and real-time blind deconvolution of scanning electron microscope imagery [J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(10): 2499~2514
- 8 A. S. Carasso. Linear and nonlinear image deblurring: a documented study [J]. *Soc. Ind. Appl. Math.*, 1999, **36**: 1659~1689
- 9 Xie Shenghua, Zhang Qiheng, Su Ding. Restoration method for turbulence-degraded image based on APEX method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(2): 88~92
谢盛华,张启衡,宿 丁. 基于 APEX 方法的湍流退化图像复原算法 [J]. *光电工程*, 2007, **34**(2): 88~92
- 10 Xie Shenghua, Zhang Qiheng, Su Ding. The improved image restoration algorithm based on APEX method [J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(2): 185~188
谢盛华,张启衡,宿 丁. 基于 APEX 方法的改进图像复原算法 [J]. *激光与红外*, 2007, **37**(2): 185~188