

文章编号:1001-5078(2007)02-0185-04

基于 APEX 方法的改进图像复原算法

谢盛华^{1,2}, 张启衡¹, 宿 丁^{1,2}

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要:在湍流退化图像复原研究中,提出了一种基于 APEX 方法的改进图像复原算法。该算法采用 APEX 方法的基本原理,结合真实湍流退化图像的频谱信息特征,对 APEX 方法中点扩展函数的估计过程进行了相应的改进,采用多方向的综合估计代替原有一次性估计,从而减少了点扩展函数的估计误差,增加了 APEX 方法的稳定性。对改进算法和原有算法进行了对比性实验研究,其结果表明,该算法对湍流退化图像的复原较原有算法在稳定性上有一定的提高,减少了随机噪声对图像复原的影响。

关键词:大气湍流;图像复原;APEX 方法;点扩展函数估计

中图分类号:TP751

文献标识码:A

The Improved Image Restoration Algorithm Based on APEX Method

XIE Sheng-hua^{1,2}, ZHANG Qi-heng¹, SU Ding^{1,2}

(1. The Institute of Optics and Electronics, the Chinese Academy of Science, Chengdu 610209, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: During the course of turbulence-degraded image restoration, an improved image restoration algorithm is proposed based on APEX method. The algorithm improves the course of estimating point spread function (PSF) in the APEX method by utilizing the basic principle of the APEX method and combining the frequency-spectrum information of real turbulence-degraded image. It substitutes the single estimation by synthetic estimation in multi-direction. So the method reduces the error of PSF estimation, and enhances the stability of the method. The compared experiment results indicate that the improved method increases the stability of turbulence-degraded image restoration, and reduce the influence of random noise on image restoration.

Key words: atmospheric turbulence; image restoration; APEX method; PSF estimation

1 引言

由于大气湍流扰动的影响,在成像探测过程中,目标图像的质量常常产生不同程度的下降,甚至导致目标形状的严重畸变,从而影响目标的探测精度。为了减少或消除大气湍流对目标探测带来的影响,众多国内外学者对湍流退化图像的复原进行了大量研究,也取得了许多的成就,盲图像复原^[1]就是其中之一。大多数都是采用迭代的方式实现图像的复原,通常都比较耗时,因此很难满足实时图像复原的要求。为了节省图像复原的时间,满足实时图像复原的要求,一些学者对非迭代式的图像复原进行了许多研究,提出了许多行之有效的算法,APEX 方

法^[2-5]就是其中之一。

APEX 方法是一种非迭代式的盲解卷算法。它以图像退化系统具有 G 类点扩展函数^[6]为假设前提,从图像退化系统输出的模糊图像入手,采用模糊图像的频谱信息估计出系统的点扩展函数(PSF),然后采用一种经典的滤波方法实现目标图像的重建。现有的大量研究也已经表明,具有 G 类点扩展函数的退化系统广泛存在于各种应用领域,例如一

基金项目:国家高技术资助预研项目(基金号:2003AA823050)。

作者简介:谢盛华(1978-),男,博士研究生,从事图像复原研究。E-mail: xsh1978120@163.com

收稿日期:2006-06-13

些天文观测、卫星探测、航空探测、电子显微扫描以及磁共振图像系统等,因此,APEX方法具有广泛的应用前景。本文是在对APEX方法深入研究的基础上,结合湍流退化图像的频谱信息特征,对APEX方法中点扩展函数的估计过程进行了适当改进,使得点扩展函数的估计具有更高的稳定性,减少了随机噪声对点扩展函数估计的影响,从而提高了图像复原的质量。本文在研究过程中,采集了一些典型的大气湍流退化图像,并采用APEX法对其进行了大量的研究分析,对比实验也表明改进的APEX算法在点扩展函数估计方面具有更高的稳定性,由此得到的复原图像质量也有所提高。

2 APEX 算法的基本原理

在湍流退化图像系统中,由于湍流是随机多变的,其点扩展函数很难用实际的数学模型表示,但是对于短曝光图像序列中的单帧图像而言,可以把图像的退化过程模型化为一个线性移不变系统,则单帧图像的退化模型可表示为:

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

其中, g 表示模糊图像; h 表示点扩展函数; f 表示目标图像; n 表示退化系统的噪声。如果其中的点扩展函数 h 在频域内可以表示为如下的形式:

$$\hat{h}(\xi, \eta) = \exp\left[-\sum_{i=1}^J \alpha_i (\xi^2 + \eta^2)^{\beta_i}\right] \quad (1)$$

$(\alpha_i \geq 0, \quad 0 < \beta_i \leq 1, \quad J \geq 1)$

则可称为退化系统具有G类的点扩展函数,其中 $\hat{h}(\xi, \eta)$ 是 $h(x, y)$ 的频谱, $\hat{h}(\xi, \eta)$ 也称为光学传递函数(OTF)。在湍流退化图像系统中,当湍流单元的尺度与成像系统望远镜的口径满足一定的关系时,则在某一时刻的图像视场范围内可以认为图像退化系统的传递函数具有单一的激励区域,因此可以近似地认为此时的湍流退化系统具有G类的点扩展函数。在假设系统具有G类点扩展函数的前提下,由式(1)可以看出,对一个图像退化系统来说可以假设 J 为1,由此系统的光学传递函数中的参数只剩下 α, β ,因此只要确定 α, β 的值,就可估计出系统的光学传递函数,经过傅里叶逆变换即可得出点扩展函数。

APEX方法估计G类点扩展函数就是根据模糊图像的频谱信息,估计出式(1)中的参数 α_i, β_i 。因为在一个实际的图像系统中,总能保证原图像 $f(x, y) \geq 0$,根据连续函数的傅里叶变换原理,则有:

$$|\hat{f}(\xi, \eta)| \leq \int_{R^2} f(x, y) dx dy = \hat{f}(0, 0) = \sigma > 0 \quad (2)$$

其中, $\hat{f}(\xi, \eta)$ 表示 $f(x, y)$ 的频谱。而对于一个线性

移不变图像退化系统,完全可以假设噪声项 $n(x, y)$ 满足下式:

$$\int_{R^2} |n(x, y)| dx dy \ll \int_{R^2} f(x, y) dx dy = \sigma > 0 \quad (3)$$

其中, σ 为一常数。如果采用 σ 分别对 $g(x, y)$, $f(x, y)$ 和 $n(x, y)$ 的傅里叶变换 $\hat{g}(\xi, \eta)$, $\hat{f}(\xi, \eta)$ 和 $\hat{n}(\xi, \eta)$ 进行标准化,则有:

$$\hat{g}^*(\xi, \eta) = \hat{g}(\xi, \eta) / \sigma$$

$$\hat{f}^*(\xi, \eta) = \hat{f}(\xi, \eta) / \sigma$$

$$\hat{n}^*(\xi, \eta) = \hat{n}(\xi, \eta) / \sigma$$

同时可以得出 $|\hat{n}^*(\xi, \eta)| \ll 1$ 。为便于讨论,假设退化系统的光学传递函数为 $\hat{h}(\xi, \eta) = \exp[-\alpha(\xi^2 + \eta^2)^\beta]$,因此有:

$$\ln |\hat{g}^*(\xi, \eta)| =$$

$$\ln \left[\exp[-\alpha(\xi^2 + \eta^2)^\beta] \hat{f}^*(\xi, \eta) + \hat{n}^*(\xi, \eta) \right] \quad (4)$$

而在频域里,一定能找到一个以频域原点为中心的区域 $\Omega = \{(\xi, \eta) | \xi^2 + \eta^2 \leq w^2\}$,在这个区域里总能使下式成立:

$$\exp[-\alpha(\xi^2 + \eta^2)^\beta] |\hat{f}^*(\xi, \eta)| \gg |\hat{n}^*(\xi, \eta)| \quad (5)$$

这个区域的半径 w 随着 α 和噪声 n 的增加而减小,因此在这个区域里可以认为下式成立:

$$\ln |\hat{g}^*(\xi, \eta)| \approx -\alpha(\xi^2 + \eta^2)^\beta + \ln |\hat{f}^*(\xi, \eta)| \quad (6)$$

又因为G类扩展函数呈辐射对称性,因此,在 (ξ, η) 平面上过原点的任一条直线上的点都能满足同一个曲线方程(5)。特别地,假设 $\eta = 0$,则有:

$$\ln |\hat{g}^*(\xi, 0)| \approx -\alpha(\xi^2)^\beta + \ln |\hat{f}^*(\xi, 0)| \quad (7)$$

$(|\xi| \leq w)$

在式(6)中 $\ln |\hat{g}^*(\xi, 0)|$ 项是已知的, $\ln |\hat{f}^*(\xi, 0)|$ 项可以根据目标图像的一些先验信息获得。而在实际的图像系统中, $\ln |\hat{f}^*(\xi, 0)|$ 是很难知道的,因此APEX方法采用了常数项代替,即:

$$\ln |\hat{g}^*(\xi, 0)| \approx -\alpha(\xi^2)^\beta - A \quad (8)$$

其中, A 是一个正实数,经过实验研究得出其取值范围在(2,6)内为最佳^[4]。根据方程(8)的函数关系式可以看出,它实际上是一个二维平面上的曲线方程,因此,只要对在 $|\xi| \leq w$ 范围内选取一些离散的 $\ln |\hat{g}^*(\xi, 0)|$ 值进行最小二乘法曲线拟合,就可确定式(8)表示的曲线方程,即得出 α, β 的值。最后将 α, β 带入式(1)即可得出估计的光学传递函数,经过傅里叶变换,即可得到点扩展函数。在得到点扩展函数的基础之上,即可采用一些经典的图像复原算法实现目标图像的恢复。

3 改进的 APEX 方法

根据前一节的论述可知, APEX 方法对点扩展函数的估计原理是在假设图像退化系统具有 G 类点扩展函数, 并且在忽略噪声对退化图像低频段干扰的情况下推导而出的。因此, 由式(6)可以看出, 只有当退化图像的频谱信息在一定范围内也严格满足辐射对称的情况下, 才能保证点扩展函数估计的稳定性。然而, 在实际湍流退化图像中, 由于湍流的复杂多变特性以及其他随机因素的影响, 一帧实际的湍流退化图像的频谱信息在 $\Omega = \{(\xi, \eta) | \xi^2 + \eta^2 \leq w^2\}$ 范围内完全满足辐射对称的条件是不可能的, 只能在一定程度上逼近或近似满足辐射对称。因此, 在 (ξ, η) 平面上选取过原点的不同直线带入式(6), 最终拟合曲线得出的 α, β 值是不同的, 从而导致了点扩展函数估计的不稳定性。这样就很难选取某一条直线上的点去拟合计算系统的光学传递函数中的 α, β 的值。如果所选取的方向正好受随机因素影响较大时, 完全有可能导致 APEX 方法的失效, 从而估计不出合理的 α, β 值。鉴于此, 本文在对大量真实采集的湍流退化图像实验研究分析的基础之上, 提出了选用多个直线方向进行曲线拟合, 得出多组不同的 α, β 值, 并计算其平均值或加权平均值作为系统点扩展函数的参数估计值, 从而避免了在单一方向上估计失真的可能性。经过大量湍流退化图像的频谱分析实验发现, 当湍流退化系统具有近似 G 类点扩展函数的时候, 在 $\eta=0, \xi=0, \eta=\xi, \eta=-\xi$ 这四个直线方向上的频谱信息是非常具有代表性的。因此, 提出在 $\eta=0, \xi=0, \eta=\xi, \eta=-\xi$ 四条直线方向上分别估计 α, β 的值, 并求其均值或加权平均, 即可得到合理的 α, β 。具体方法如下:

选取四条直线: $\eta=0, \xi=0, \eta=\xi, \eta=-\xi$ 并带入方程(5), 经过整理, 则分别可得以下几式:

$$\ln |\hat{g}^*(\xi, 0)| \approx -\alpha(\xi^2)^\beta - A_1 \quad (9)$$

$$\ln |\hat{g}^*(\eta, 0)| \approx -\alpha(\eta^2)^\beta + A_2 \quad (10)$$

$$\ln |\hat{g}^*(\xi, \xi)| \approx -\alpha(2\xi^2)^\beta + A_3 \quad (11)$$

$$\ln |\hat{g}^*(\xi, -\xi)| \approx -\alpha(2\xi^2)^\beta + A_4 \quad (12)$$

根据式(9)、式(10)、式(11)、式(12), 在湍流退化图像的频谱中, 选取相应的四个不同方向上的离散点的频谱值, 并对其进行最小二乘法曲线拟合, 即可得到四组不同的值: $\alpha_1, \beta_1; \alpha_2, \beta_2; \alpha_3, \beta_3; \alpha_4, \beta_4$ 。通过求其平均或加权平均, 即可得出的光学传递函数中 α, β 的估计值, 将其代入公式(1), 经过反傅里叶变换, 即可得出估计的点扩展函数值。

4 实验结果及其分析

为了验证前面所述的方法在湍流退化图像复原中的实际效果, 采集了一些真实的湍流退化图像, 并对其进行了实验研究分析。图 1 是一幅湍流退化图像, 采用前面所述的原理, 分别在 $\eta=0, \xi=0, \eta=\xi, \eta=-\xi$ 四个方向上分别估计出 $\alpha_1, \beta_1; \alpha_2, \beta_2; \alpha_3, \beta_3; \alpha_4, \beta_4$, 然后采用综合平均的方式得出一组总的 α, β 值, 并将其代入方程(1)得出光学传递函数的值, 通过该光学传递函数恢复出的图像如图 2 所示。然后根据 $\alpha_1, \beta_1; \alpha_2, \beta_2; \alpha_3, \beta_3; \alpha_4, \beta_4$ 的值分别代入式(1)得出四个不同的光学传递函数, 并分别对退化图像图 1 进行复原, 其结果如图 3 ~ 图 6 所示。从图 3 ~ 图 6 可以看出, 采用单一方向上的频谱信息估计点扩展函数时, 由于受随机因素的干扰, 有可能造成 APEX 方法的完全失效, 如图 4 所示的复原结果。而采用多方向综合估计法, 则可以有效的抑制随机因素的干扰, 从而保证了 APEX 方法的稳定性, 其对图像的复原结果如图 2 所示。

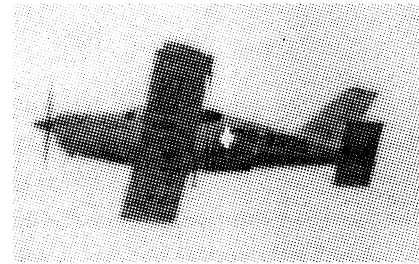


图 1 湍流退化图像

Fig. 1 turbulence-degraded image

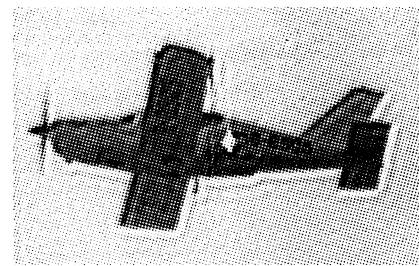


图 2 采用多方向的综合估计对图 1 中退化图像的复原结果

Fig. 2 restoration results of the degraded image on Fig. 1 by synthetic estimation in multi-direction

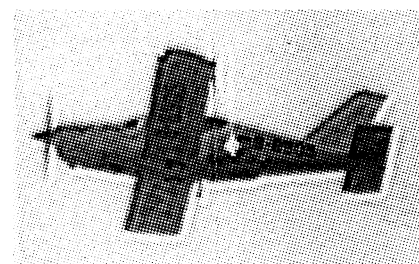


图 3 当 $\eta=0$ 时湍流退化图像的复原结果

Fig. 3 when $\eta=0$ restoration results of the degraded image of Fig. 1

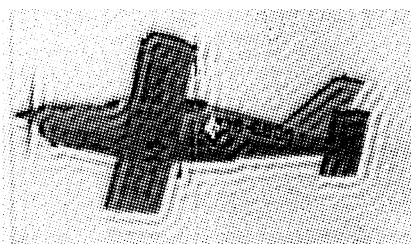


图4 当 $\xi=0$ 时图1中退化图像的复原结果

Fig. 4 when $\xi=0$ restoration results of the degraded image of Fig. 1

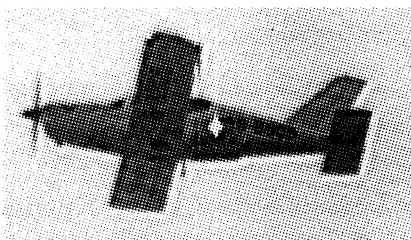


图5 当 $\eta=\xi$ 时图1中退化图像的复原结果

Fig. 5 when $\eta=\xi$ restoration results of the degraded image of Fig. 1

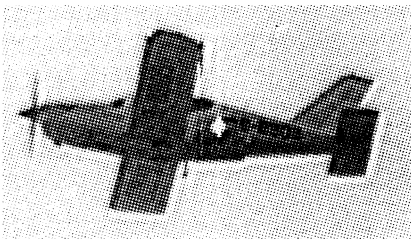


图6 当 $\eta=-\xi$ 时图1中退化图像的复原结果

Fig. 6 when $\eta=-\xi$ restoration results of the degraded image of Fig. 1

5 结论

以上的理论分析和实验结果都表明,采用改进的 APEX 方法进行湍流退化图像复原无论在理论上,还是在实践上都是可行的。而且,改进的 APEX 方法增加了该类算法的抗干扰能力,提高了图像复原的稳定性。此外,它有简单的原理和运算过程,在实时图像处理方面具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] Deepa Kundur, Dimitrion Hatzinakos. Blind image deconvolution[J]. IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE. 1996, (5): 43-64.
- [2] A S Carasso. Direct blind deconvolution[J]. SIAM (soc. Ind. Appl. Math.)J. Appl. Math. 2001, 61: 1980-2007.
- [3] A S Carasso. APEX method and real-time blind deconvolution of scanning electron microscope imagery[J]. Optical engineering, 2002, 41(10): 2499-2514.
- [4] A S Carasso. Linear and nonlinear image deblurring: a documented study[M]. SIAM (Soc. Ind. Appl. Math) J. Numer. anal. , 1999, 36: 1659-1689.
- [5] A S Carasso. Image restoration and diffusion process [A]. Proc. SPIE, 1993, 2035: 255-266.
- [6] W Feller. An Introduction to probability theory and its applications. 2nd, New York: Wiley, 1995.

关于《激光与红外》网上稿件审理系统的说明

一、登录系统

登录激光与红外网站(www.laser-infrared.com),点击“激光与红外杂志”导航菜单即可进入系统页面。

二、用户注册

系统采用“邮件激活”的方式自由注册。填写个人基本信息要准确、真实,特别是通信联系方式要详实,以便及时联系。为确保您的 E-mail 准确有效,注册后,系统会很快通过 E-mail 发送“注册成功通知单”,按照系统提供的有关信息,打开“激活用户”网页点击“激活”命令按钮即可正常使用。

审稿人,可由愿意承担本刊审稿的人员担任,须经本人注册申请、编辑部审核同意后,即可开展审稿工作。

三、关于稿件

登录“在线投稿”系统后,通过“稿件管理”栏下的“稿件查询”菜单,可看到稿件的整个进程状态和审理记录,如果投稿后在此看不到新稿信息,说明投稿不成功,需重投。

不要使用“投稿”菜单投修改稿,否则系统将视为重复投稿。请通过“稿件管理”的“上传/下载修改稿”菜单,针对“退修”意见,下载上传修改稿:如果是作者本人要求修改稿件内容,请用 E-mail 通知编辑部,经系统“退修”后,按上述步骤进行即可。建议使用 Ms Office 2003 Word“工具”菜单下的“修订”功能修改稿件,以便查看修改记录,保证稿件审理进度。

由于其他原因,作者要求撤稿,请通过 E-mail 通知编辑部,系统将作“退稿”处理。