

· 物理电子学 ·

采用改进的退化模型恢复湍流降质图像

荣 健, 申金娥, 丁学科, 李 芳, 邝爱华, 刘文鑫

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

【摘要】采用考虑湍流内外尺度影响的退化模型来恢复大气湍流降质图像, 运用包含了湍流内外尺度影响的波结构函数、折射率谱以及薄透镜成像的退化函数导出了新的退化模型。相对由Kolmogorov谱推导出的模型, 该模型引入了更完整的先验约束条件, 更接近大气湍流的物理特性。针对飞机目标湍流退化图像, 利用约束最小二乘滤波的方法对该退化模型进行了复原验证, 模拟结果表明了该模型比较理想, 恢复效果较好。

关键词 约束最小二乘滤波; 降质图像; 大气湍流退化模型; 湍流内外尺度; 恢复图像
中图分类号 TP317.4 **文献标识码** A

Improved Model for Restoring Turbulence Degraded Image

RONG Jian, SHEN Jin-e, DING Xue-ke, LI Fang, KUANG Ai-hua, and LIU Wen-xin

(School of Physical Electronic, University of Electronic Science and Technology Chengdu 610054)

Abstract A new degradation model including the influence of outer-and inner-scale of turbulence is presented to restore atmospheric turbulence degradation images. This new model is derived from the wave structure function and refractive index profiles considering turbulence internal and external scale and thin lens imaging degradation function. Compared with the model derived from Kolmogorov spectrum, the new model introduces more complete transcendent constraints and is more similar to the physical characteristics of atmospheric turbulence. Aiming at the turbulent degraded images comprising aircraft targets, constrained least squares filtering method is used to test the recovery power of the new degradation model. Simulation results show the effectiveness of the new model.

Key words constrained least squares filter; degraded image; degradation model of atmospheric turbulence; outer-and inner-scale of turbulence; restore image

为了对付空中威胁与反空袭, 空中目标如飞机或者导弹的远距离成像的探测研究发挥了越来越重要的作用。由于大气层的存在, 在光线进入探测器窗口之前, 大气湍流随机干扰光波传播, 使焦平面上的像点强度分布扩散, 峰值降低, 图像模糊, 位置偏移, 严重限制了成像系统的分辨能力和性能, 给目标识别带来了很大的困难。研究人员在克服大气干扰、恢复退化图像方面做了大量的工作, 提出许多方法与技术^[1-4], 但这些方法都还不够完善。

图像恢复是利用退化现象的某种先验知识, 建立退化现象的数学模型, 简称“退化模型”, 再根据退化模型进行反向的推演运算, 以恢复原来的图像。提高图像的恢复质量关键在于: (1) 采用先进的、具有鲁棒性和抗噪性的最优化恢复方法。(2) 引入完整

的先验约束知识建立起与实际点扩展函数尽可能接近的退化模型^[5]。

考虑湍流内外尺度影响的退化模型是根据包含湍流内外尺度影响的波结构函数、折射率谱推导得到的, 比文献[6-7]中直接由忽略湍流内外尺度影响的Kolmogorov折射率谱得到的退化模型更贴近大气湍流的物理特性。本文针对飞机目标湍流退化图像, 利用约束最小二乘滤波的方法对该退化模型进行了复原验证。

1 大气湍流退化模型

大气湍流成像系统的退化模型为^[7]:

$$\langle H(\Omega) \rangle = H_0(\Omega) \exp\left[-\frac{1}{2} D_\psi(\lambda\Omega)\right] \quad (1)$$

式中 Ω 为空间角频率; $H_0(\Omega)$ 为物理光学系统的

收稿日期: 2007-05-08; 修回日期: 2007-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(60572079)

作者简介: 荣 健(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事空间光电系统方面的研究。

退化函数; $\exp[-\frac{1}{2}D_\psi(\lambda\Omega)]$ 为大气湍流的退化函数; λ 为光波长; $D_\psi(\lambda\Omega)$ 为大气湍流波结构函数。

假设物理成像是薄透镜, $\Omega_0 = D_0 / \lambda$ 为光学系统的截止空间角频率, D_0 为光学系统的直径, 有:

$$H_0(\Omega) = \begin{cases} 0 & \text{其他} \\ \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right) - \frac{\Omega}{\Omega_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^2} \right] & \Omega \leq \Omega_0 \end{cases} \quad (2)$$

传统的大气湍流退化模型由忽略湍流内外尺度影响的Kolmogorov谱推导而来^[8], 即:

$$\langle H(\Omega) \rangle = H_0(\Omega) \exp\left[-3.44 \left(\frac{\lambda\Omega}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}}\right] \quad (3)$$

式中 $r_0 = 0.185[\lambda^2(C_n^2 L)^{-1}]^{3/5}$ 是Fried常数。式(3)仅仅跟波长、Fried常数、空间角频率相关。

改进的退化模型由包含了湍流内外尺度影响的波结构函数推导而来。在均匀各向同性湍流大气中, 光波通过大气传播到达L处时的波结构函数为^[8]:

$$D_\psi(\rho) = 8\pi k^2 L \int_0^\infty [1 - J_0(\kappa\rho)\Phi_n(\kappa, l_0, L_0)] \kappa d\kappa \quad (4)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为传输光束的光波波数; L 为光波在湍流中传输的距离; $J_0(\kappa\rho)$ 为零阶贝塞尔函数,

$\rho = f\lambda z = \frac{\Omega D}{\Omega_0}$ ($0 \leq z \leq L$) 为距光源为L处垂直于

传输路径的横向平面内某点到该平面中心的距离, κ 为空间波数; l_0 、 L_0 分别为湍流内、外尺度; $\Phi_n(\kappa, L_0, l_0)$ 为考虑了湍流内外尺度影响的Von Karman简化折射率谱^[9]。则有:

$$\Phi_n(\kappa, L_0, l_0) = 0.016 5C_n^2 \kappa^{-11/3} [\exp(-\kappa^2 / \kappa_m^2) + 1 - \exp(-\kappa / \kappa_0^2)] \quad (5)$$

式中 C_n^2 为湍流折射率结构常数; $\kappa_m = 5.92 / l_0$; $\kappa_0 = 2\pi / L_0$ 。将式(5)代入式(4), 通过计算得到:

$$D_\psi(\rho) = 1.73r_0^{-5/3} \left\{ \rho^{5/3} - 2.98\kappa_0^{-5/3} \times \left[{}_1F_1\left(-\frac{5}{6}; 1; -\frac{\kappa_0^2 \rho^2}{4}\right) - 1 \right] + 2.98\kappa_m^{-5/3} \times \left[{}_1F_1\left(-\frac{5}{6}; 1; -\frac{\kappa_m^2 \rho^2}{4}\right) - 1 \right] \right\} \quad (6)$$

由于实际使用的成像系统的直径D往往远小于湍流外尺度 L_0 且远大于湍流内尺度 l_0 , 且所观察的传输场处于 $\rho \leq D/2$ 的范围内, 将合流超几何函数

${}_1F_1\left(-\frac{5}{6}; 1; -\frac{\kappa_0^2 \rho^2}{4}\right)$ 中的 ρ / L_0 (即 $\rho^2 \kappa_0^2 / 4$) 作小量展开, 即:

$${}_1F_1\left(-\frac{5}{6}; 1; -\frac{\kappa_0^2 \rho^2}{4}\right) \approx 1 + \frac{5/6 \rho^2 \kappa_0^2}{4} \quad (7)$$

考虑到成像系统满足 $\kappa_m \rho \geq 1$, 将合流超几何函数

${}_1F_1\left(-\frac{5}{6}; 1; -\frac{\kappa_m^2 \rho^2}{4}\right)$ 中 $\frac{\rho^2 \kappa_m^2}{4}$ 作展开, 即有:

$${}_1F_1\left(-\frac{5}{6}; 1; -\frac{\kappa_m^2 \rho^2}{4}\right) \approx \frac{1}{\Gamma(11/6)} \left(\frac{\kappa_m^2 \rho^2}{4}\right)^{5/6} \quad (8)$$

根据上述近似, 式(6)可以写为:

$$D_\psi(\rho) = 1.73r_0^{-5/3} \left\{ \rho^{5/3} - 2.98\kappa_0^{-5/3} \frac{5\rho^2 \kappa_0^2}{24} + 2.98\kappa_m^{-5/3} \frac{6}{5\Gamma(5/6)} (\kappa_m^2 \rho^2 / 4)^{5/6} \right\} \quad (9)$$

把式(9)代入式(1), 联立 $\rho = \frac{\Omega D}{\Omega_0}$ 得退化模型为:

$$\langle H(\Omega) \rangle_{LE} \approx H_0(\Omega) \exp\left\{ -0.865r_0^{-5/3} \left[\left(\frac{\Omega D}{\Omega_0}\right)^{5/3} - 0.62\kappa_0^{1/3} \left(\frac{\Omega D}{\Omega_0}\right)^2 + \frac{2.38}{\Gamma(5/6)} \left(\frac{\Omega D}{2\Omega_0}\right)^{5/3} \right] \right\} \quad (10)$$

比较式(10)与式(3)可得, 本文的湍流退化模型不仅跟波长、Fried常数、空间角频率相关, 而且还考虑了湍流模型的直径、外尺度、截止空间角频率, 它引入了更完整的先验约束参数。

2 约束最小二乘方滤波

由于逆滤波法在复原图像时对噪声非常敏感, 维纳滤波法需要知道未退化图像和噪声的功率谱, 而未退化图像和噪声的功率一般都未知。约束最效二乘方滤波的恢复方法只要求知道噪声方差与均值(该参数都能从一幅给定的退化图像计算出来), 而且用它处理的每一幅图像都能产生最优的结果, 所以本文采用约束最小二乘滤波的方法对该退化模型进行复原验证。约束最小二乘滤波器的表达式如下^[10]:

$$\hat{F}(u, v) = \left[\frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + s|P(u, v)|^2} \right] G(u, v) \quad (11)$$

式中 $\hat{F}(u, v)$ 为复原图像的傅里叶变换; $H^*(u, v)$ 为退化函数 $H(u, v)$ 的复共轭; $|H(u, v)|^2 = H(u, v)H^*(u, v)$; $P(u, v)$ 为函数 $p(x, y)$ 的傅里叶变换, 有:

$$p(x,y) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中 $G(u,v)$ 为退化图像 $g(x,y)$ 的傅里叶变换; s 为可调参数, 它的取值控制着对估计图像加光滑性约束的强度, 当 s 满足约束条件 $\|g - H\hat{f}\|^2 = \|n\|^2$ 时 (n 表示加性噪声), 图像就能达到最优结果^[10]。为了寻求满足要求的 s 值, 只要知道噪声的均值与方差, 通过迭代计算就能得到最佳的复原结果。

3 模拟结果与分析

为了检验改进的退化模型的有效性, 本文采用约束最小二乘滤波法, 将它与传统的大气湍流退化模型进行了对比验证, 如图1和图2所示。

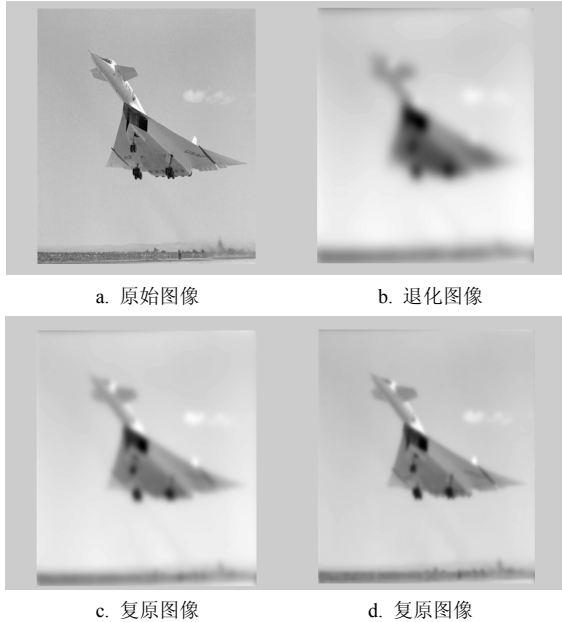


图1 未加噪时对比模拟图

在未考虑加性噪声时, 对比两种退化模型的恢复能力如图1所示, 图1a为原始图像, 图1b为用光学软件生成的湍流退化图像, 图1c和图1d分别是采用式(3)(由Kolmogorov谱得到的退化模型)和式(10)(考虑湍流内外尺度影响的退化模型)对图1b进行复原的图像。

在考虑了加性噪声后, 对比两种退化模型的恢复能力如图2所示。图2a所示为在图1b基础上加上了均值为0, 方差为0.001的高斯噪声, 图2b和图2c分别是采用式(3)与式(10)对图2a进行复原的图像。

从图1c、1d和图2b、2c可以看出, 采用考虑湍流内外尺度影响、更加接近大气湍流的物理特性的折射率谱推导得到的退化模型, 比由Kolmogorov谱推导得到的退化模型恢复的图像轮廓更加清晰, 细

节更加明显。

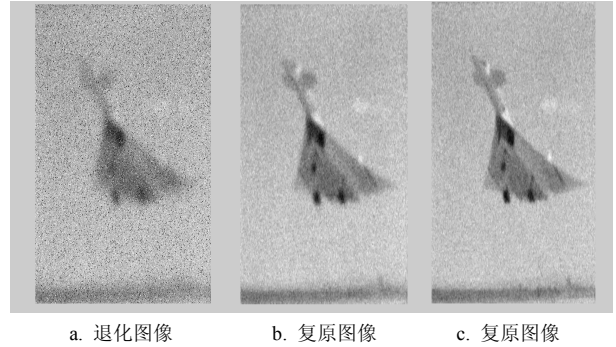


图2 加噪时对比图像

下面进一步与原始图像之间的灰度均方根误差 (R_{MSE}) 作为客观的评价参数来度量退化图像的性能, 假设 $f(i,j)$ 为原始图像 (i,j) 位置的灰度值, $\hat{f}(i,j)$ 为复原图像 (i,j) 位置的灰度值, M 和 N 为图像的尺寸, 则 R_{MSE} 评价准则为:

$$R_{MSE} = \left\{ \frac{1}{NM} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} [\hat{f}(i,j) - f(i,j)]^2 \right\}^{1/2} \quad (13)$$

当均方根误差越小, 说明处理图像与理想图像越接近, 恢复效果越好。

各处理图像的均方根误差如表1所示。

表1 各图的均方根误差

图像标号	R_{MSE}	图像标号	R_{MSE}
1b	16.309 3	2a	26.207 6
1c	10.199 8	2b	15.422 8
1d	7.490 9	2c	11.523 3

显然, 图1c、图1d与图2b、图2c的均方根误差分别远小于图1b和图2a, 这说明采用合适的退化模型可以大大地改善大气湍流退化图像的质量。而图1d的均方根误差比图1c小26.56%, 图2c的均方根误差比图2b小25.28%, 这说明采用考虑内外尺度的湍流退化模型更能提高恢复质量。

4 结束语

本文提出采用考虑湍流内外尺度影响的退化模型来恢复湍流降质图像。该退化模型与波长、Fried常数、空间角频率相关, 还考虑了湍流模型的直径、外尺度、截止空间角频率, 它引入了更完整的先验约束参数。针对飞机目标湍流退化图像, 利用约束最小二乘滤波的方法对该退化模型进行了复原验证, 结果表明了采用考虑湍流内外尺度影响的湍谱得到的退化模型, 比由Kolmogorov谱得到的退化模型更加接近大气湍流的物理特性, 恢复效果更好。

(下转第950页)

控系统的输入响应模型, 将板极模型放到更为真实完备的系统级模型中进行验证, 可以逐步建立系统级的验证环境。

参 考 文 献

- [1] FELIX T S, CHAN H K. Design of a PCB plant with expert system and simulation approach[J]. *Expert Systems with Applications*, 2005, (3): 409-423.
- [2] RICCI F, HOANG L H. Modeling and simulation of FPGA based variable-speed drives using simulink[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2003, (3): 183-195.
- [3] CHADHA B, WELSH J. Architecture concepts for simulation-based acquisition of complex system[C]//*Summer Computer Simulation Conference*. [S.l.]: [s.n.], 2000.
- [4] WAITE W F. High level architecture for simulation based acquisition system-engineering automation[C/CD]. *Proceedings of the Simulation Interoperability Workshop*. [S.l.]: [s.n.], 1999.
- [5] WILCOX A P, BURGER A G, HOARE P. Advanced distributed simulation: a review of developments and their implication for data collection and analysis[J]. *Simulation Practice and Theory*, 2000, (8): 201-231.
- [6] 徐 辉, 王祖强. 软硬件协同设计和系统级仿真探索[J]. *中国工程科学*, 2006, (4): 61-65.
XU Hui, Wang Zu-qiang. Co-design and co-simulation on the system level[J]. *Engineering Science*, 2006, (4): 61-65.
- [7] 缪云青, 李永刚. FPGA器件在嵌入式系统中的配置方式的探讨[J]. *微计算机信息*, 2006, (11): 101-106.
MIAO Yun-qin, LI Yong-gang. Research on method of FPGA configuration in embedded system[J]. *Microcomputer Information*, 2006, (11): 101-106.
- [8] 贾荣珍, 王行仁. 协同仿真环境体系结构[J]. *系统仿真学报*, 2001, (6): 5-10.
JIA Rong-zheng, WANG Xin-ren. The architecture of collaborative simulation environment[J]. *Journal of System Simulation*, 2001 (6): 5-10.
- [9] 谢海斌, 张代兵. 基于MATLAB/SIMULINK与FLUENT的协同仿真方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2007, (8): 86-90.
XIE Hai-bing, ZHANG Dai-bin. Collaborative simulation based on MATLAB/simulink and fluent[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, (8): 86-90.
- [10] WILLIAM D B, WAYNE M L. A heterogeneous environment for hardware/software cosimulation[C]//*Simulateion 30th Annual Symposium*. New York: [s.n.], 1997.

编辑 黄 莘

(上接第 892 页)

参 考 文 献

- [1] YOU Yu-li, KAVEH M. A regularization approach to joint blur identification and image restoration[J]. *IEEE Trans Imag Processing*, 1996, 5(3): 417-428.
- [2] LIU Chun-sheng, LI Ming. A novel atmospheric turbulence-degraded image restoration algorithm based on support vector regression[C]//*Sitxh International Symposium on Instrumentation and Control Technology*. Beijing, China: International Society for Optical Engineering, 2006.
- [3] KILMER B M, MILLER M E. Wavelet domain image restoration with adaptive edge-preserving regularization[J]. *IEEE Trans Image Processing*, 2000, 9(4): 597-608.
- [4] HUANG Hong-hua, ZHU Wen-yue, RAO Rui-zhong. Restoration of image degraded by the atmospheric turbulence[C]//*Proceedings of SPIE*. Bellingham: SPIE, 2005, 5981: 1-9.
- [5] 洪汉玉, 喻九阳, 陈以超, 等. 红外目标湍流退化图像的优化复原算法[J]. *应用光学*, 2006, 27(6): 510-515.
HONG Han-yu, YU Jiu-yang, CHEN Yi-chao, et al. Optimization restoration algorithm for infrared object turbulence-degraded image[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(6): 510-515.
- [6] 张逸兴, 迟泽英. 光波在大气中的传输与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 176-182.
ZHANG Yi-xin, CHI Ze-ying. Optical wave propagations and imaging in an atmospheric turbulence[M]. Beijing: China National Defence Industry Press, 1997: 176-182.
- [7] 张逸新, 朱 拓, 陶纯堪. 湍流大气成像系统分辨率的研究[J]. *光学与光电技术*, 2004, 2(4): 1-4.
ZHANG Yi-xin, ZHU Tuo, TAO Chun-kan. Study of the optical resolution of imaging system in turbulence[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, 2(4): 1-4.
- [8] MICHAL H, STANISLAVA S. Probabilistic model based restoration of short-exposure astronomical images[C]//*Sixth IASTED International Conference on Signal and Image Processing 2004*. Honolulu, HI, USA: Acta Press, 2004: 619-624.
- [9] 张逸兴. 湍流大气中激光传输波前扭曲规律研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
ZHANG Yi-xin. Wave front twist of a laser beam propagation in an atmospheric turbulence[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005.
- [10] 姚 敏. 数字图像处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 103-105
YAO ming. Digital image processing[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 103-105.

编辑 黄 莘