

doi: 10.3788/lop47.051004

扩展目标幸运成像技术的理论和实验研究

杨忠良 梁永辉 胡浩军 施建华 任晨纲 于起峰

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 地基望远镜的成像分辨率通常都受到大气湍流的限制, 这种限制在对扩展目标进行观测成像时变得尤为显著。幸运成像技术是一种基于目标序列短曝光图像选取、配准、叠加的事后图像处理方法, 能够有效降低大气湍流导致的成像闪烁和抖动对图像质量的影响, 提高望远镜的成像分辨率。介绍了扩展目标幸运成像技术的基本原理和基本流程, 并应用该项技术对近地扩展目标大气湍流成像的实验观测数据进行事后处理。处理结果表明, 幸运成像技术能够提高扩展目标通过湍流大气的成像分辨率。

关键词 数字图像处理; 幸运成像; 相关配准; 非等晕性; 像质评价

中图分类号 O439 OCIS 100.2000 100.2980 文献标识码 A

Theoretical and Experimental Research of Lucky Imaging Technique about Extended Objects

Yang Zhongliang Liang Yonghui Hu Haojun Shi Jianhua Ren Chengang Yu Qifeng

*(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,**Changsha, Hunan 410073, China)*

Abstract The imaging resolution of all ground-based telescopes is severely limited by the effects of atmospheric turbulence, especially for imaging the extended objects. The lucky imaging technique is an image post-processing method based on selecting-recentring-coadding of sequence short-exposure images of objects, which can reduce the influence of image quality because of turbulence-induced imaging motion-blur restoration and reduce the resolution loss. The basic theory and flow of lucky imaging are introduced, and then this technique is used on the data of experimental observation of extended objects through atmospheric turbulence. The results show that the lucky imaging technique can improve the imaging resolution of extended objects through atmospheric turbulence.

Key words digital image processing; lucky imaging; correlation registration; anisoplanatic; image quality estimation

1 引言

在地面目标监视以及天文观测领域, 提高成像观测系统的成像分辨率尤为重要。由于大气湍流的存在, 地基成像系统的分辨率受到很大的限制。湍流引起大气折射率分布不均匀, 导致光波通过大气传输之后, 波前发生畸变, 极大损害了光学系统的成像质量和分辨率。而一般情况下, 地-地路径上的湍流影响要比高空的情况严重得多。近地观测时, 湍流的线性尺度大小 r_0 (r_0 为 Fried 常数, 也称大气相干长度) 和大气相干时间 t_0 要比对空观测时小 1 个数量级, 所以对近地扩展目标进行成像观测时, 成像面上往往包含了多个等晕区, 而不同的等晕区受大气湍流影响导致波前的畸变信息不一致。因此, 扩展目标的高分辨率成像要比点目标复杂得多。A. Labeyrie^[1] 在 1970 年对目标在大气中的短曝光图像进行了研究, 相对于长曝光图像,

收稿日期: 2009-08-10; 收到修改稿日期: 2009-10-15

作者简介: 杨忠良(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事图像处理方面的研究。E-mail: youngyezhi@126.com

导师简介: 于起峰(1958—), 男, 博士, 教授, 主要从事精密光测图像处理方面的研究。E-mail: yuqifeng@vip.sina.com

短曝光图像不存在积分效应引起的图像模糊, 包含有目标的高分辨率结构信息。M. I. Charnotskii^[2]理论分析了湍流中的非等晕短曝光图像的问题, 在除去每一帧的局部倾斜误差之后, 通过序列平均的方法能够提高图像的分辨率, 而实际上由于等晕区较小和高次像差, 分辨率的改善很有限。Doald Fraser 等^[3]在处理中对每一帧图像畸变进行逐点估计, 并相应地纠正了每一帧的变形量。Mikhail A. Vorontsov 等^[4]使用人工湍流层做了一系列的实验来研究穿过湍流大气的非等晕成像的问题。2003 年, Robert Nigel Tubbs^[5]运用短曝光技术, 并结合选取-配准-叠加的图像处理方法在天文观测中取得了重大的成就, 并最终把该项技术定名为幸运成像技术(Lucky Imaging)。

本文介绍了大气湍流的基本理论及非等晕成像的特点, 阐述了扩展目标幸运成像技术的基本原理和办理流程, 指出处理过程中的像质评价、相关配准和分块处理等关键技术, 最后应用该处理方法, 对实验观测得到的扩展目标序列短曝光图进行事后处理。

2 大气湍流及非等晕成像的特点

大气湍流造成了大气折射率的随机变化, 变化的累积效应导致大气折射率廓形的明显不均匀性, 从而在湍流大气中传输光束的波前也将作随机起伏, 由此引起光束抖动、强度起伏(闪烁)、光束扩展和像点抖动等一系列光传输的大气湍流效应^[6]。在湍流影响下, 孔平面两点之间的相位差不仅与两点的相对位置有关, 而且依赖于天顶角, 即接收孔平面上两个确定的点对应于不同天顶角的相位差不同。这种相位差变化规律随着天顶角的改变而改变的特性, 称为大气的非等晕性^[7]。如果把大气中某一区域分割成许多小区域, 使得在每一个小区域中, 两点之间的相位差跟天顶角近似无关, 则这些区域称为等晕区^[7], 相应的角度称为等晕角, 如图 1 所示。其中 γ_1 、 γ_2 表示不同的顶角, r_1 、 r_2 表示距离孔径中心不同距离的两个确定的点。图 1(b)、(c)中, 纵坐标表示相位, 横坐标表示距离, (b)和(c)分别表示对应于不同的天顶角 γ_1 和 γ_2 时相位的变化曲线。表达式 $\varphi(r_2, \gamma_1) - \varphi(r_1, \gamma_1)$ 和 $\varphi(r_2, \gamma_2) - \varphi(r_1, \gamma_2)$ 表示对于不同一天顶角的入射光时 r_1 、 r_2 两点间的相位差。若湍流集中在高度为 z_0 的一个薄层中, 等晕角与 r_0 有一个简单的关系即 $\theta_p = 0.62(r_0 / z_0)$ 。

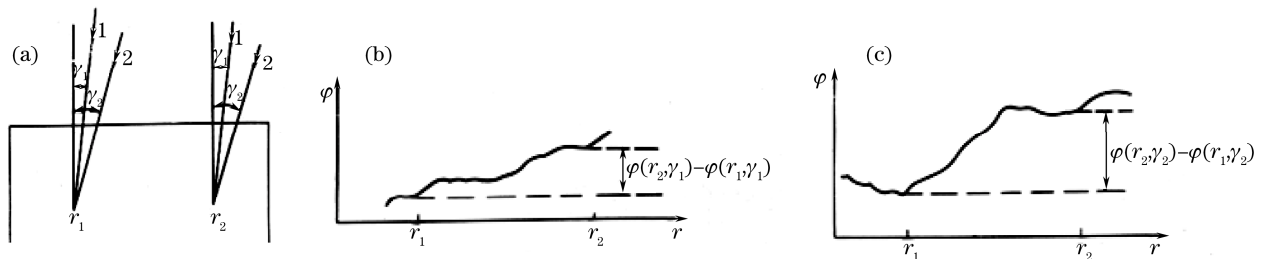


图1 大气非等晕性示意图。(a)光线从不同的角度入射; (b)沿 γ_1 入射光线的相位变化曲线; (c)沿 γ_2 入射光线的相位变化曲线
Fig.1 Sketch map of atmospheric anisoplanatism. (a) lights from different incident angles; (b) phase involution curve of incident light along γ_1 ; (c) phase involution curve of incident light along γ_2

目标成像在一个等晕区内, 可以认为目标上各点经历了大气湍流之后的畸变信息基本一致, 但如果像面上包含了多个等晕区, 图像上不同部分的随机位移就会有所不同。在这种非等晕成像条件下, 对于宽视场, 不同的区域由于经历的大气湍流状况不一样, 呈现出彼此之间的相位畸变信息不相关(或者弱相关)。分析得出, 对目标进行短曝光成像, 原始图像中可能包含了比较好的高频信息的细节, 而在长曝光的平均效应下, 这种细节由于随机运动被平滑了^[2]。

D. L. Fried^[8]在分析比较长曝光、短曝光近场和短曝光远场光学成像分辨率得出, 成像系统的实际分辨率主要受 D/r_0 的影响, 其中 D 为成像系统接收面的孔径。通过对成像系统分辨率的研究进一步发现^[9], 大气湍流的变化相当快, 其时间尺度大约为几十毫秒, 因此 r_0 也是在不断变化中。当 D/r_0 的值较小时, 入射光波波前畸变相对较弱, 甚至可以忽略, 这时对目标进行快速短曝光拍摄, 得到的短曝光像中存在一定概

率的“幸运图像”，其出现的概率

$$P_{\text{fr}} \approx 5.6 \exp[-0.1557(D/r_0)^2], \quad D/r_0 \geq 3.5. \quad (1)$$

由(1)式可以看出，若 r_0 不变，随着 D 的增大， P_{fr} 不断减小；若 D 不变，随着 r_0 的减小， P_{fr} 也不断减小。在非等晕条件下获得一帧“幸运图像”的几率是很小的，但在单帧短曝光图像中可能包含了局部区域像质相对较好的“幸运区域”^[2]。如果成像面上包含了 N 个等晕区，则获取一个“幸运区域”的概率要高于获取一帧“幸运图像”的概率(至少是 N 倍)^[4]。现在的问题是如何区别这些好的区域并把它们挑选出来，以此来联合输出一幅分辨率显著提高的整图。

3 扩展目标幸运成像技术的基本原理

基于非等晕成像的特点，扩展目标的高分辨率重建要复杂得多，对扩展目标的成像观测应用幸运成像技术，主要是基于图像选取-配准-叠加的方法对目标序列短曝光图像进行事后处理。该方法能够有效降低大气湍流导致的成像闪烁和模糊对图像质量的影响，提高望远镜的成像分辨率。

幸运成像技术主要包括图像的选取、配准、叠加3个过程，天文点目标的事后处理要求在同一个等晕区内存在较亮的导星作为配准叠加的基准，而对于扩展目标的成像观测，由于成像面上包含了多个等晕区，因此，处理过程要比点目标复杂得多。这就要求在对整帧图像处理之前，对图像进行分块处理，对每一个子块进行选取-配准-叠加，然后联合子块幸运成像结果输出一幅完整的清晰度得到明显改善的图像。另外，在对序列短曝光图应用该项技术之前，一般情况下，要根据系统的随机噪声和低频背景干扰等特点，对图像进行噪声滤除和背景抑制等预处理。综上所述，扩展目标的幸运成像处理流程可以用图2表示。

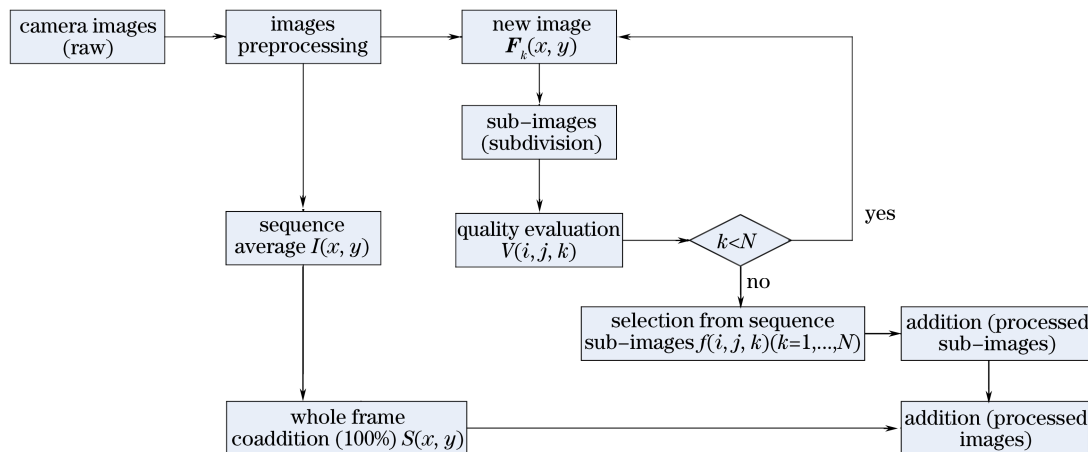


图2 扩展目标幸运成像处理流程图

Fig.2 Flow chart of lucky imaging processing for extended objects

$$I(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i(x, y), \quad (2)$$

图中 N 为所采集序列短曝光图像的帧数， $F_k(x, y)$ 为图像的灰度矩阵，序列平均图像100%全帧偏移叠加图像 $S(x, y)$ 是以序列平均图像 $I(x, y)$ 为基准，所有帧相对于 $I(x, y)$ 作配准叠加得到的结果图像。

从扩展目标幸运成像处理流程中可以看出，选取-配准-叠加仍是幸运成像技术的核心思想。在图像选取的时候首先要对于序列图像进行像质评价，计算像质评价价值。边缘是图像最基本的特征，图像的轮廓、细节基本都存在于图像的边缘部分，而图像越清晰，则图像中包含的细节丰富，边缘锐利，用数字图像方法计算得到的灰度梯度值则越大。基于这一点，本文采用的像质评价函数引入边缘检测理论，采用灰度梯度统计的方法^[10]。通过对每一帧图像计算像质评价价值，然后按照从大到小排列，可以得到目标序列短曝光

图像清晰度的一个较为准确的估计。处理流程中图像的配准叠加是幸运成像处理中关键的一步，一共涉及了3处需要进行配准的地方。配准是否精确直接关系到成像分辨率是否得到显著提高，本文采用了数字相关的方法进行图像配准。相关配准的方法是计算2个图像重叠部分的相关系数，以相关系数极大值位置作为配准位置。由于各幅图像的噪声是随机分布的，叠加过程相当于均值滤波的过程，噪声被削弱，而信号则得到加强，因此叠加之后得到的图像，质量将会优于原始图像。

对扩展目标在可见光下进行成像观测，由于光线来自不同的方向，传输通道经历了不同的大气状态，受到的大气扰动也不一样。所以对于非等晕成像，目标面上不同的点之间的角间隔呈现出相位畸变不相关或者弱相关^[4]。因此，每次把图像处理限制在视场中的一小部分，进行分块处理，使它一直在一个等晕窗口里工作。图像分块之后，对于每一个子区域，即可视为处在一个等晕区内。在同一个子区域内，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幸运选取-配准-叠加，可以显著提高该区域的成像分辨率和图像信噪比。

4 扩展目标幸运成像观测实验

实验中使用的观测目标为人工合作目标，采用全中文文本，目标靶面大小为42 cm×29.7 cm，字体大小为15 mm×15 mm，行间距为15 mm，如图3所示。使用文本的原因是基于其具有统一的分辨率且人的大脑习惯于辨认。实验观测距离约为250 m，成像观测系统采用35.6 cm口径的望远镜结合高速像机，以此来采集扩展目标的序列短曝光图像。大气湍流的时间变化尺度非常快，一般拍摄时需要采用高帧频拍摄。高帧频必然会减少每一帧的曝光时间，每一帧的信息量就会相对较少。一般情况下，在夏季明朗或者全日照的情况下，单帧的信噪比较好。

● 我们看到某个激动人心的场景—可能是白雪皑皑的群山或者是新英格兰迷人的秋色，这时我们往往会一把抓过照相机，把这幅景致摄入镜头。然而，我们获得的却往往是一幅令人沮丧的影像，原来场景中那些丰富多彩的画面一个也没有抓住。如果我们用彩色胶片进行拍摄，看到的却是所有那些绝妙的鲜艳色彩变成了令人厌烦乏味的一片苍白。如果拍摄的是黑白胶片，照片会充斥着死气沉沉的褪了色一般的灰色调。我们会总是损失了那些明快的颜色和色调。

图3 中文文本合作目标
Fig.3 Cooperative object of Chinese text

实验拍摄时取帧频为250 Hz，曝光时间为1.25 ms，共拍摄5000帧。按照扩展目标幸运成像处理方法，考虑到拍摄时湍流的影响程度和成像的模糊情况，对截取的目标图像实行4×4分块，再分别以0.02%，0.1%，0.2%，0.5%不同的选取比例进行幸运叠加处理，其中对于5000帧图像选取0.02%即表示选取图像序列中最清晰的子图。处理结果如图4所示。

图4中左侧显示的是处理之后的整图结果，右侧是取自对应的每一幅图左上角的一小块局部，图题括号内的数据即是应用像质评价函数得到的像质评价值。图4(a)为序列平均结果，相当于一幅长曝光图像；图4(c)~(f)为不同选取比例得到的处理结果，分别对应叠加1幅、5幅、10幅、25幅得到的结果图像。首先，对比原始图中最好的和最差的2幅图可以看出，成像路径上由于大气湍流的存在，产生的图像抖动和运动模糊会极大地限制系统的成像分辨率，而通过设置合适的望远镜口径和拍摄参数，能够得到受湍流影响几乎可以忽略不计的“幸运图像”；从视觉效果细节分辨上以及评价值的定量上分析，通过幸运选取-配准-叠加得到的结果图像能够显著地降低大气湍流的影响，提高观测系统的成像分辨率，图像文字的细节

基本达到清晰辨认的程度，而随着选取比例的增大，图像得到平滑，在选取 0.2% 的情况下，图像清晰度的评价值仍然优于最好的原始图像。



图 4 扩展目标幸运成像处理结果。(a)序列平均(3.0909×10^8); (b)100%全帧偏移叠加(4.7139×10^8); (c)0.5%幸运叠加(1.4227×10^9); (d)0.2%幸运叠加(1.4983×10^9); (e)0.1%幸运叠加(1.6472×10^9); (f)0.02%幸运叠加(1.9388×10^9); (g)原始图中最好的一帧(1.4629×10^9); (h)原始图中最差的一帧(1.0199×10^8)

Fig.4 Results of lucky imaging processing for extended objects.(a)sequence average (3.0909×10^8); (b)100% whole frame coaddition (4.7139×10^8); (c)lucky images with 0.5% selection (1.4227×10^9); (d)lucky images with 0.2% selection (1.4983×10^9); (e)lucky images with 0.1% selection (1.6472×10^9); (f)lucky images with 0.02% selection (1.9388×10^9); (g)individual frame with highest image quality over the original images (1.4629×10^9);(h)individual frame with lowest image quality over the original images (1.0199×10^8)

5 结 论

应用幸运成像技术对近地扩展目标的序列短曝光图像进行事后处理，验证了幸运成像技术能够有效降低大气湍流导致的成像闪烁和抖动对图像质量的影响。在非等晕条件下，对目标进行短曝光成像，存在一定比例包含“幸运区域”的单帧图像，幸运的概率和大气湍流状况、望远镜口径大小、拍摄参数有关。在取得对大气湍流参数的定量统计以及根据大气状况选择合适的望远镜口径、拍摄参数和分块大小的条件下，将能够进一步提升幸运成像技术的性能。从实验观测和处理结果中发现，对于建立一个基于幸运成像技术实用的成像观测系统，除了着手发展软硬件结合使得能够实时进行图像处理之外，提高效率，其望远镜口径、相机帧频和分块窗口大小能够重新设置，在运行效果上也是非常有意义的。

参 考 文 献

- 1 A. Labeyrie. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by Fourier analyzing speckle patterns in star images[J]. *Astron. Astrophys.*, 1970, **6**(1): 85~87
- 2 M. I. Charnotskii. Anisoplanatic short-exposure imaging in turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1993, **10**(3): 492~501

- 3 Donald Fraser, Glen Thorpe, Andrew Lambert. Atmospheric turbulence visualization with wide-area motion-blur restoration [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, **16**(7): 1751~1758
- 4 Mikhail A. Vorontsov, Gary W. Carhart. Anisoplanatic imaging through turbulent media: image recovery by local information fusion from a set of short-exposure images[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2001, **18**(6): 1312~1324
- 5 Robert Nigel Tubbs. Lucky Exposures: Diffraction Limited Astronomical Imaging Through the Atmosphere[D]. Cambridge: Cambridge University, 2003. 9
- 6 Rao Ruizhong. Light Propagation in the Turbulent Atmosphere[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2005. 7
饶瑞中. 光在湍流大气中的传播[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005. 7
- 7 Zhou Renzhong, Yan Jixiang, Zhao Dazun. Adaptive Optics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996. 22~24
周仁忠, 阎吉祥, 赵达尊. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996. 22~24
- 8 D. L. Fried. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**(10): 52~61
- 9 D. L. Fried. Probability of getting a lucky short-exposure image through turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, **68**(12): 1651~1658
- 10 Jiang Ting, Tan Yuegang, Liu Quan. Research of a clarity-evaluation function of image based on sobel[J]. *Computer Digital Engineering*, 2008, **36**(8): 129~131
蒋 婷, 谭跃刚, 刘 泉. 基于Sobel算子的图像清晰度评价函数研究[J]. 计算机与数字工程, 2008, **36**(8): 129~131