

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0298-05

大气相干长度的测量及其对幸运成像技术的影响

刘 镔¹ 任晨纲¹ 杨忠良² 孙 穗¹ 胡浩军¹ 梁永辉¹

(¹国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; ²第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

摘要 介绍了一种有限距离上大气相干长度测量系统的原理和方法, 给出了在长沙实验测量的初步测量结果。分析了大气相干长度对目标序列图像中“幸运图像”概率的影响。实验得到的数据和近地湍流强弱情况相符, 大气相干长度的变化显著影响了获得“幸运图像”的概率, 证明该种测量方法对幸运成像参数的选取具有一定的参考价值。

关键词 图像处理; 幸运成像; 大气相干长度; 测量

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201037s1.0298

Measurement of Atmospheric Coherence Length and Effects on Lucky Imaging Technique

Liu Qiang¹ Ren Chengang¹ Yang Zhongliang² Sun Sui¹ Hu Haojun¹ Liang Yonghui¹

¹ College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China
² The Second Artillery Engineering College, Xi'an, Shaanxi 710025, China

Abstract The principle and instrument for the measurement of atmospheric coherence are described and the results measured at Changsha are reported in this article. The impact of the atmospheric coherence length on the probability of "lucky image" is analyzed. The experimental data is coincide with the near-earth line turbulence strength, changes in atmospheric coherence length significantly affect the probability of "lucky image", it is verified that the measurement method can provide certain reference significance of the parameter selection of lucky imaging.

Key words image processing; lucky imaging; atmospheric coherence length; measurement

1 引 言

在地面目标监视以及天文观测领域, 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, 极大地损害了光学系统的成像质量和分辨率。如何减小成像路径上大气湍流对图像造成的影响, 提高地基成像系统的分辨率, 一直是成像观测领域的重要课题和研究前沿^[1]。幸运成像技术是一种用于湍流成像的事后处理技术。它利用高速相机拍摄目标的短曝光图像, 以较短曝光时间冻结大气湍流的影响, 然后从中选

取像质较好的图像进行配准、叠加以得到输出图像。该技术选取了受大气湍流影响较小的短曝光图像进行处理, 所得复合(叠加)图像的分辨力大大高于所有短曝光图像直接叠加所得的长曝光图像的分辨力。

大气状态参数主要包括大气相干长度 r_0 , 大气相干时间 t_0 和等晕角 θ_0 。其中 r_0 能够表征某一特定成像路径中一定横向间距上的综合湍流强度, 与光波波长和传输距离等因素有关, 是一个非常重要的定标参量^[2]。在幸运成像技术中, r_0 影响着序列短曝光图像中“幸运图像”的概率以及分块处理时子

收稿日期: 2010-04-16; 收到修改稿日期: 2010-06-10

作者简介: 刘 镔(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事图像处理方面的研究。E-mail: liuqiang5@126.com

导师简介: 梁永辉(1972—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理和自适应光学等方面的研究。

E-mail: yonghuiliang@sina.com

窗口尺寸的选择。因此,在幸运成像实验时,对大气湍流状况参数进行测量,对获取短曝光图像时拍摄参数设置、事后处理中叠加比例的选取以及分块^[3]都有重要的指导意义。

本文介绍了在近地面有限距离上基于点光源长曝光图像的大气相干长度的测量原理和方法。在此基础上,建立实验测量系统,对幸运成像实验拍摄时的典型大气状态进行了 r_0 的实验测量,得到了初步的实验结果。研究了 r_0 与“幸运图像”概率的关系,验证了弗里德(Fried)得出的概率公式。

2 测量原理与方法

大气相干长度 r_0 的物理意义是任何光学系统对经大气湍流扰动的光波成像,其分辨率不会超过口径为 r_0 的光学系统的衍射极限分辨率,即光波经过大气湍流传播后,其相位扰动的空间相干尺度不会超过 r_0 。在可见光波段典型大气湍流条件下的 r_0 约几厘米到几十厘米^[4]。由于大口径地面光学望远镜等天文选址和高分辨成像的需要,国内外的学者在测量理论、方法以及仪器等方面进行了大量的研究。目前,测量大气相干长度 r_0 的一种较为流行的方法即是采用双孔径的差分像运动法(DIMM)或差分到达角起伏法^[5],在 DIMM 中通常假定大气湍流是局地均匀各向同性的,而相干长度是一个统计量,因此 DIMM 在实际测量中,只关心良好的 r_0 出现的概率,测量某个时刻的 r_0 不是主要目的。在幸运成像实验研究时,更关心拍摄序列短曝光图像时较短时间的大气湍流状态,因此采用了一种较简易的方法,通过测得点光源的半峰全宽值(FWHM, $W_{1/2}$), r_0 值可表示为

$$r_0 = 0.98\lambda/W_{1/2}. \quad (1)$$

2.1 大气相干长度的测量原理

2000 年 Glindemann 等^[6]在分析湍流影响的望远镜点扩散函数(PSF)的过程中,提出基于 Roddier 的薄层近似^[7],当波通过一个高度为 h 的扰动薄层时,相位与折射率分布的关系可表示为

$$\phi_h(\mathbf{r}) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_h^{h+\delta h} n(\mathbf{r}, z) dz, \quad (2)$$

式中 δh 为层厚,而 $\mathbf{r}=(\xi, \eta)$ 为水平位置矢量。通过薄层后的复振幅为

$$\Psi_h(\mathbf{r}) = \exp[i\phi_h(\mathbf{r})], \quad (3)$$

需要利用复振幅的相关函数来描述复数波,定义为

$$\Gamma_h(\mathbf{r}) = \langle \Psi_h(\mathbf{r}') \Psi_h^*(\mathbf{r}' + \mathbf{r}) \rangle = \langle \exp\{i[\phi_h(\mathbf{r}') - \phi_h(\mathbf{r}' + \mathbf{r})]\} \rangle. \quad (4)$$

由于望远镜焦平面上的光强分布是望远镜孔径处相关函数的傅里叶变换,因此受湍流影响的 PSF^[8]可以通过在望远镜孔径的圆域内对入瞳处的相干函数进行积分得到。现在,相关函数复振幅的确定问题已经被化成了计算结构函数 $D_{\phi,h}(\mathbf{r})$ 的相位。假设 δh 远大于波动的相关尺度,可以得到,对于进入第 i 层(高度为 h_i)的水平波前,其离开该层时的相位结构函数为

$$D_{\phi,h_i}(\mathbf{r}) = 2.91 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \delta h_i C_{n_i}^2 r^{5/3}, \quad (5)$$

式中 $r=|\mathbf{r}|$, C_{n_i} 为折射率结构常数。

利用迭代方法计算多层的相关函数,可得到地面上望远镜口径上的相关函数为

$$\langle \Psi_0(\mathbf{r}') \Psi_0^*(\mathbf{r}' + \mathbf{r}) \rangle = \exp\left[-\frac{1}{2} D_{\phi,0}(\mathbf{r})\right], \quad (6)$$

式中

$$D_{\phi,0}(\mathbf{r}) = 2.91 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (\cos \gamma)^{-1} r^{5/3} \int C_n^2(h) dh, \quad (7)$$

$D_{\phi,0}$ 是相位的结构函数,描述的是受扰波前的物理形状。引入 Fried 常数 r_0 ,即大气相干长度,可以进一步简化公式为

$$r_0 = \left[0.423 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (\cos \gamma)^{-1} \int C_n^2(h) dh \right]^{-3/5}. \quad (8)$$

望远镜口径上的相位结构函数现在可以写为

$$D_{\phi,0}(\mathbf{r}) = 6.88 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{5/3}, \quad (9)$$

相关函数可以写为

$$\Gamma_0(\mathbf{r}) = \langle \Psi_0(\mathbf{r}') \Psi_0^*(\mathbf{r}' + \mathbf{r}) \rangle = \exp\left[-3.44 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{5/3}\right]. \quad (10)$$

假设从望远镜中观测一个点光源,受湍流限制的点扩散函数可由相关函数在望远镜口径上的傅里叶积分计算得出,图 1 显示的就是受限于湍流的 PSF,也称为“视宁盘”^[9]。高斯函数模型能够对其很好地模拟,然而这种高斯近似的视宁盘收敛到零的速度要快于实测的视宁图样。其中 FWHM 视宁

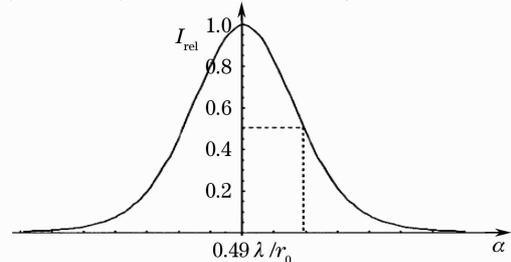


图 1 视宁盘中的强度分布

Fig. 1 Intensity distribution in a seeing disk

盘的半峰全宽值为 $0.98 \lambda / r_0$ 。

2.2 大气相干长度的测量系统和方法

实验系统的硬件部分主要由高帧频的相机、图像采集卡、计算机、望远镜组成。实验用望远镜为 Meade LX200R, 该型号望远镜的规格为口径 $D=254$ mm, 焦距 $f=2500$ mm, 高速相机为 Optronis CamRecord CL600X2, 相机的帧频为 500 f/s, 最短曝光时间 $1 \mu\text{s}$ 。

系统的硬件连接是将高速相机接于望远镜的目镜位置, 构成一个完整的光学成像系统, 高速相机由两根 CamLink Full 数据线与安装在计算机中的图像采集卡连接, 接收和传输数据, 计算机用于存储和处理数据。

测量大气相干长度 r_0 时于相机和望远镜之间安装了滤光片, 这样就能较好地对单一波长的入射光成像, 滤光片的中心波长为 850 nm, 带宽为 100 nm。拍摄目标为单个红外 LED 灯, 观测距离为 680 m。实验中以 20 Hz 的拍摄帧频分别于晚上和白天拍摄了多组试验数据。

主要采用基于图像强度分布的方法对 FWHM 进行统计, 实际情况中图像灰度值反映了强度信息, 所以计算时首先找到灰度最大值点作为点源强度的极值点, 再找到灰度值为一半的位置作为半峰值点。统计

两点之间的像素距离, 它的两倍即为半峰全宽值^[10]。

3 实验结果及分析

3.1 大气相干长度的测量结果及分析

在白天和晚上的多个时段进行了 LED 灯长曝光图像的采集, 长曝光的曝光时间在 20 ms 左右。下列的实验结果及分析部分所涉及的实验数据有三组: 第一组是 2009 年 6 月 29 日晚上 21:41 采集的, 第二组是 2009 年 7 月 8 日晚上 20:27 采集的, 第三组是 2009 年 7 月 11 日中午 11:17 采集的, 采集帧数均为 2000 f, 拍摄帧频均为 20 f/s。

测量大气相干长度需要首先测得点目标长曝光图像的 FWHM, 点源序列图像 FWHM 的计算, 是采用程序的方法, 首先找到亮度中心点, 然后沿着水平、垂直、斜 45° 和斜 135° 4 个方向上向前、向后分别搜索一半亮度(即灰度值为最大值的一半)的坐标分量, 前后坐标分量相减的绝对值即为某方向上的 FWHM, 4 个方向上的平均作为最终的点源目标的 FWHM, 得到数据以像素为单位, 像素数和每个像素对应的角秒数的乘积可换算得到以弧度为单位的半峰全宽值。通过将 FWHM 值转化为以弧度为单位, 并应用(1)式得到 r_0 的统计值。图 2 给出了实验测得的 r_0 。

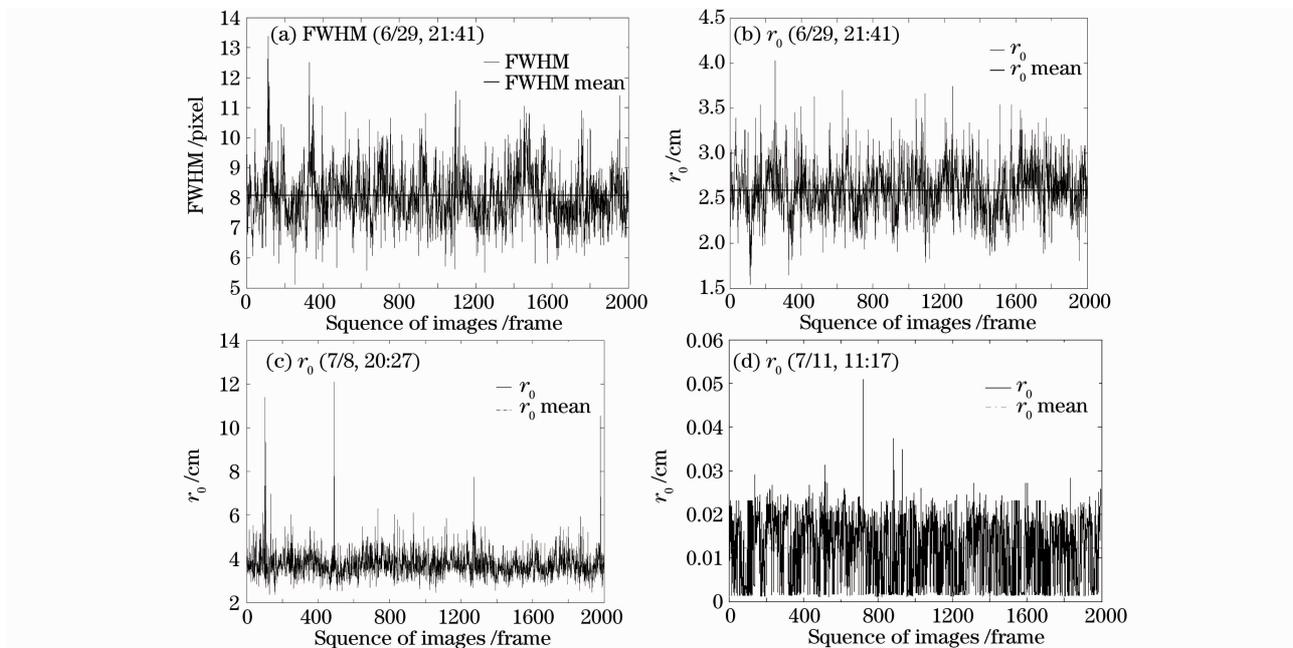


图 2 FWHM 与 r_0 的分布曲线

Fig. 2 Distributing graph of FWHM and r_0

由图 2 的统计可见, 晚上的 r_0 最大值在 9 cm, 大部分在 3 cm 左右, 而白天的统计值除极少数情况在 2 cm 以上, 大部分在 1 cm 附近。由于拍摄的帧频

较高, 可以将各组数据中 r_0 的平均值作为当时大气状态的度量, 即三个时刻的大气相干长度 r_0 分别为 2.731, 3.756 和 1.219 cm, 实验得到的数据和近地

湍流强弱情况以及白天和晚上的差异基本相符,验证该种测量方法测得的大气相干长度具有一定的参考意义。

3.2 大气相干长度对“幸运图像”概率的影响

1978年Fried通过对成像系统分辨率的研究发现^[11],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”,其出现的概率表示为

$$P_{fr} \approx 5.6 \exp[-0.1557(D/r_0)^2] \quad D/r_0 \geq 3.5, \quad (11)$$

Fried对“幸运图像”的定义为,在望远镜入瞳面上波前相位畸变的均方值 $\Delta^2 \leq 1 \text{ rad}^2$,这在理论上

已经是接近衍射极限的效果。由(11)式可以看出,在望远镜口径 D 一定的情况下, r_0 的大小决定了获取“幸运图像”的概率大小。应用幸运成像技术对扩展目标进行成像观测,总是希望在拍摄的序列短曝光图像中能有更多的“幸运图像”,因此在拍摄序列短曝光图像时,测量当时的大气相干长度 r_0 ,根据当时的视宁条件选择合适的望远镜口径以及选取适当的叠加比例,可以进一步提高光学系统透过湍流成像的性能。

在3.1节中测量了3个不同时刻的FWHM和 r_0 ,使用完全相同的拍摄参数在3种不同大气视宁条件下拍摄了3组序列图像。经过图像预处理和像质评价,得到3组数据的像质评价参数分布曲线,如图3所示。

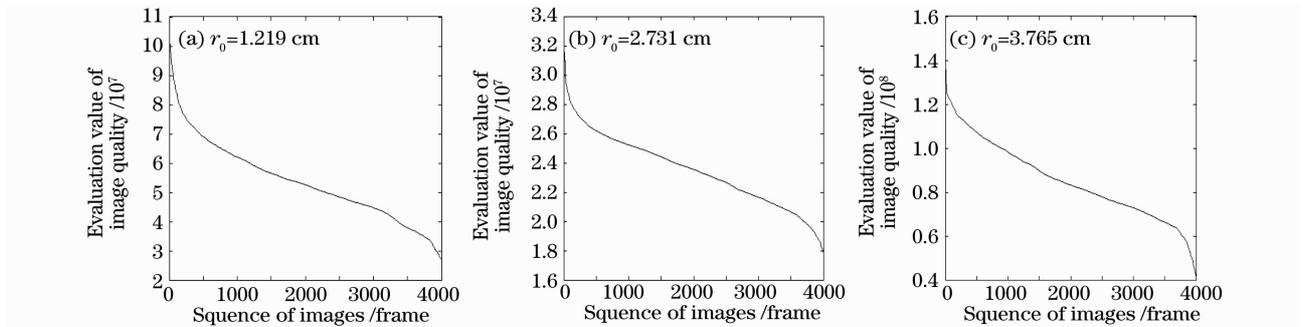


图3 不同大气状态条件下序列图像像质评价参数分布曲线

Fig. 3 Distributing graph of image quality estimation in different atmosphere conditions

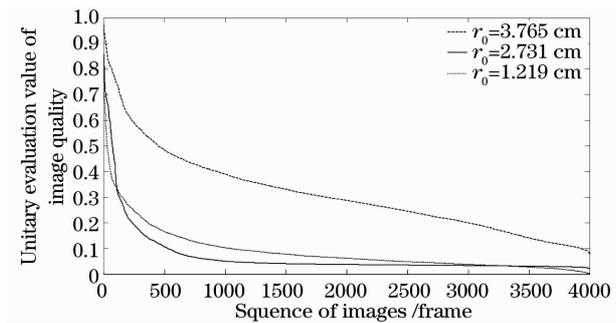


图4 归一化像质评价参数分布曲线

Fig. 4 Unitary evaluation value of image quality

为了便于比较三者的概率问题,将3组评价价值都进行归一化处理,图4显示的3条曲线即为图3中不同大气状态条件下图像像质评价价值经过归一化处理的结果,从图中可以看出,如果以归一化评价价值大于0.7的图像作为“幸运图像”,则 $r_0 = 3.765 \text{ cm}$ 时获取“幸运图像”的概率最高, $r_0 = 2.731 \text{ cm}$ 时“幸运图像”的概率高于 $r_0 = 1.219 \text{ cm}$ 时,这和Fried得出的概率公式中概率是随着 D/r_0 增大而减小的结论吻合。

4 结 论

通过理论推导,得到了通过测量点光源的FWHM来计算大气相干长度 r_0 的方法,完成了近地面有限路径上 r_0 的测量,实验得到的数据和近地湍流强弱情况以及白天和晚上的差异基本相符,同时研究了 r_0 与幸运成像中“幸运图像”概率的关系,结论和Fried得出的概率公式中概率是随着 D/r_0 增大而减小的结论吻合。该测量方法可以和幸运成像实验共用一套实验系统,算法简单,结果可靠。测量结果可以为幸运成像实验提供一定的指导。

参 考 文 献

- 1 F. Roddier. The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy[J]. *Progress in Optics*, 1981, **19**: 281~376
- 2 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
- 3 Yang Wenxia, Cai Chao, Ding Mingyue *et al.*. Characterization of aero-optic effects and restoration of aero-optical degraded images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 347~352
杨文霞, 蔡超, 丁明跃等. 气动光学效应分析与气动模糊图像

- 复原[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 347~352
- 4 Tao Xiaoping, Feng Huajun, Lei Hua *et al.*. A splicing method of sectioned restoration algorithm for images with space-variant point spread function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 648~653
- 陶小平, 冯华君, 雷 华 等. 一种空间变化 PSF 图像分块复原的拼接方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 648~653
- 5 Huang Honghua, Yao Yongbang, Rao Ruizhong. Measurement of atmospheric coherent length by four-aperture differential image motion method[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(3): 357~360
- 黄宏华, 姚永帮, 饶瑞中. 四孔差分像运动测量大气相干长度的方法研究[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(3): 357~360
- 6 A. Glindemann, S. Hippler, W. Hackenberg. Adaptive optics on large telescopes[J]. *Experimental Astronomy*, 2000, **10**(1): 5~47
- 7 F. Roddier. The Effects of Atmospheric Turbulence in Optical Astronomy[M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Co., 1981
- 8 Huang Jianming, Shen Mangzuo. Multiframe blind deconvolution restoration of atmospheric turbulence-degraded images based on noise characteristic [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1686~1690
- 黄建明, 沈忙作. 基于噪声特性的大气湍流退化图像多帧盲反卷积复原[J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1686~1690
- 9 J. E. Baldwin, R. N. Tubbs, G. C. Cox *et al.*. Diffraction-limited 800 nm imaging with the 2.56 m Nordic optical telescope [J]. *Astrophysics*, 2001, **368**(1): L1~L4
- 10 Sijiong Zhang, Frank F. Suess, Craig D. Mackay. Anisoplanatic Lucky Imaging for Surveillance [D]. *Institute of Astronomy, University of Cambridge*, 2006
- 11 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): 1372~1379