

文章编号: 1001-4322(2007)03-0357-04

# 四孔差分像运动测量大气相干长度的方法研究\*

黄宏华, 姚永帮, 饶瑞中

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 大气光学中心, 合肥 230031)

**摘 要:** 介绍了最新研制的基于四孔差分像运动法到达角起伏测量仪, 利用该仪器测量的 4 个方向(两组正交方向)上的到达角起伏方差, 从而推算出大气相干长度。在近地面水平路径的实验中发现, 不同方向上的测量结果获得的大气相干长度值有一定的差别。测量结果表明, 大气湍流存在一定的各向异性, 在实际应用中应考虑这个因素, 在一些应用场景下, 大气相干长度应根据至少一组正交方向的测量结果来分析确定。

**关键词:** 大气湍流; 差分像运动法; 大气相干长度; 统计特征

中图分类号: P427.1

文献标识码: A

激光在湍流大气中传输时, 大气湍流造成的折射率起伏导致了激光波阵面的畸变, 破坏了激光的相干性, 并会引起传输光束随机漂移、扩展、畸变、闪烁等, 这些现象统称为大气湍流效应。在激光大气传输和自适应光学相位校正技术中, 描述湍流效应的影响、评价激光传输及其相位校正的效果时, 广泛采用的一个物理量即是 Fried 参量  $r_0$ , 通常也称为大气相干长度, 该参量与大气湍流强度、激光波长和传输距离等因素相关, 是一个非常重要的定标参量。在天文观测中, 通常也把大气相干长度  $r_0$  当作视宁度的度量, 而其大小常被作为天文选址的重要依据之一<sup>[1]</sup>。因此, 充分了解该参量的基本特性, 是湍流大气光学的一个重要任务。

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的理论、方法以及仪器等方面进行了大量的研究<sup>[2-7]</sup>。在整层大气激光传输和自适应光学相位校正等方面, 亦开展了相应的研究工作<sup>[8-10]</sup>。对大气相干长度  $r_0$  的测量, 目前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)。由于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, 与测量方向无关<sup>[5]</sup>, 因此在 DIMM 的某些实际测量(如在天文台选址中进行的整层大气测量)中, 只关心良好的  $r_0$  出现的频率, 在这种应用场合以很高的精度测量某个时刻的  $r_0$  不是主要目的。因此, 实验中多是依据某一方向的测量结果计算相干长度。但是, 在实际的工程应用中, 有时也仅关心较短时间内的大气湍流状态<sup>[10]</sup>。从聚焦光束水平路径传输光斑漂移的实验中发现, 光斑的漂移量在不同的方向上有明显的差别。在内陆某地的实验中发现铅直方向的漂移量大于水平方向的漂移量<sup>[11]</sup>, 而在沿海实验中发现铅直方向的漂移量小于水平方向的漂移量<sup>[12]</sup>。由此可以看出, 光斑的漂移具有明显的非各向同性特征。另外, 自适应光学相位校正效果的评价也往往以  $r_0$  作为参照, 因此也常常关注较短时间内的准确的相干长度的数值。如果根据不同的方向上的测量结果获得的大气相干长度数值相差较大, 而在实际应用中直接采用某一个方向的相干长度用以评价激光大气传输和自适应光学相位校正的效果, 则必然会带来一定的影响。因此, 为了较为全面地定量描述大气相干长度的方向特征, 本文基于 DIMM 法研制了一套四孔差分到达角起伏测量仪, 它可同时在两组正交方向上进行差分到达角的测量, 并计算出相应的  $r_0$  值。利用这套仪器在近地面的水平路径上进行了初步观测, 对测量的结果进行了初步分析。

## 1 计算原理与方法

差分像运动法最初是由 Stock 和 Keller 于 1960 年提出的<sup>[2,5]</sup>, 它是通过测量同一波前上不同点的到达角的相对起伏来得到相干长度, 1975 年 Fried 推导得出了差分到达角起伏的方差公式, 从而奠定了差分像运动法的理论基础, Roddier 于 1981 年得到的结果被广泛采用, 并用来计算  $r_0$ <sup>[13]</sup>。该方法是将天体目标发出的光通过两个子孔径后到达成像系统, 利用光楔或其它方法使目标在 CCD 上形成两个分离的像, 并分别记录它们在一定时间内的分离位置, 然后计算它们之间距离分离量的方差, 此方差也为经两个子孔径的波前倾斜差。对大

\* 收稿日期 2006-09-15; 修订日期 2007-01-29

基金项目 国家 863 计划项目资助课题

作者简介 黄宏华(1976—), 男, 博士研究生, 主要从事大气光学参数特性、湍流图像传输等研究; hhhuang@aiofm.ac.cn.

于两孔基线长度的湍流元,它们对两孔的波前倾斜是相等的,因此 DIMM 方法测量的是相对小的尺度的起伏,即对应于图像高频的运动。一般情况下,湍流外尺度值大于两孔基线间的距离,因而该方法对外尺度的影响不敏感。

由于天体恒定运动,进行到达角起伏测量的望远镜系统也要一直跟踪目标连续转动,机械振动是不可避免的,它带来的像点抖动必然叠加在到达角起伏中<sup>[1]</sup>。但两个孔径受到的机械振动是相同的,而 DIMM 只需要计算分离图像之间的位置变化,因此该方法能够消除由跟踪引起的机械振动、外界对成像系统造成的机械噪声。另外,它只要求两孔分离间基线间距大于两倍以上子孔径直径,所以在工程实现上也较为方便。

可以按照两个正交方向分别进行抖动的计算,相对于子瞳的连线方向,一个为径向,另一个为横向。径向及横向方向上计算  $r_0$  的公式分别为

$$\sigma_1^2 = 2\lambda^2 r_0^{-5/3} [0.179D^{-1/3} - 0.0968d^{-1/3}] \quad (1)$$

$$\sigma_2^2 = 2\lambda^2 r_0^{-5/3} [0.179D^{-1/3} - 0.145d^{-1/3}] \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为激光传输波长;  $D$  为子瞳直径;  $d$  为子瞳中心间距;  $\sigma_1^2$ 、 $\sigma_2^2$  分别为平行和垂直于两子瞳连线方向上的图像分离量的方差。这就是所谓的 DIMM 方法的原理。通常都使用两孔,也曾有使用三孔的研究<sup>[6]</sup>。如果 4 个孔上进行差分到达角起伏测量,就可获得两组正交方向上的结果,大大丰富了大气湍流的统计特征的方向信息,为工程应用提供重要参考数据。为此,我们研制了四孔差分到达角起伏测量仪。

## 2 仪器结构

四孔差分到达角起伏测量仪主要由施密特-卡塞格林望远镜、四棱锥光楔分光系统、CCD 相机、图像采集卡和 PC 机组成,如图 1 所示。望远镜的口径  $D$  为 35.56 cm,焦距为 355.6 cm。镜前附加了一块光瞳板,其上

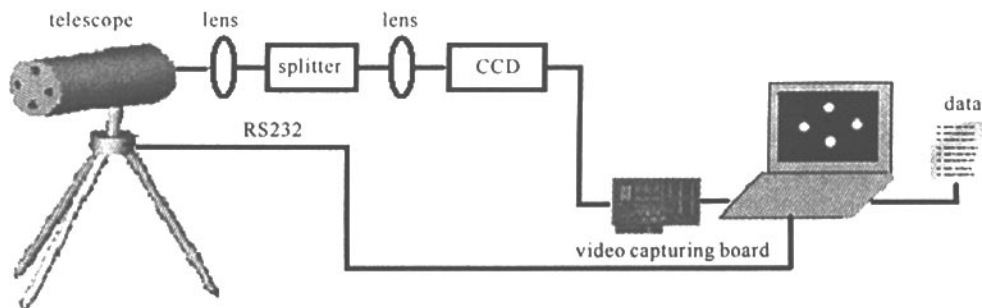


Fig. 1 Experimental setup of four aperture DIMM coherence length measurement

图 1 四孔差分到达角起伏测量示意图

开了 4 个直径为 5 cm 的小孔,水平和铅直方向上的两孔间距离均为 20 cm,四孔配置如图 2 所示。在望远镜焦距处放置了一个焦距为 25 cm 的透镜,随后为四棱锥光楔,光楔后面放置了一个焦距为 100 cm 的透镜,在透镜焦距处为成像 CCD,这样就可以得到同一目标的 4 个像,并放大了望远镜的焦距。4 个子孔按照十字样式配置,它们可以组成 6 组不同的基线,可以测量图 2 所示的 4 个方向上的到达角起伏。

为了保证统计的连续性、准确性和特征一致性,系统应具备较高的图像帧频、CCD 曝光时间必须小于大气相干时间,否则图像的高频运动信息会丢失,  $r_0$  测量会偏大<sup>[14-15]</sup>。为此,该系统采用中国科学院自动化研究所制造的 OK1100 逐行扫描 CCD。该 CCD 逐行扫描,整幅画面同时曝光,同时转移,从而避免普通 CCD 分两场曝光,隔行扫描,所得图像存在错位的问题。CCD 帧频选在 135 Hz,曝光时间为 7 ms。

利用该仪器,我们以卤钨灯为光源在 1 km 水平路径进行了测量。为使采集时间短一些,以提高测量的时间精度,一次采集多帧图像至计算机缓存,然后再进行计算 4 个像点间的位置变化,并以 1 min 为间隔进行连续采集测量。

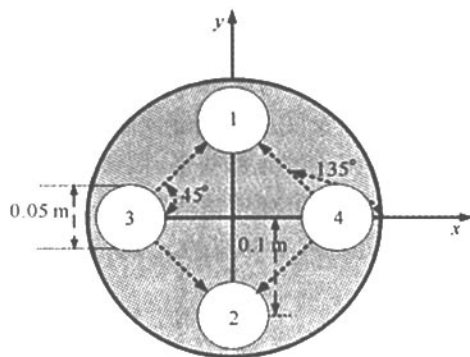


Fig. 2 Configuration of four aperture module

图 2 四孔配置图

### 3 初步测量结果及分析

图 3 为随机选取的 2006 年 8 月 15 日 17:00 ~ 20:00 时间段内, 每 5 min 抽取一个数据以说明  $0.55 \mu\text{m}$  大气相干长度值在不同方向上的情况。

从图 3 测量值可以看出, 就同一组测量数据而言, 水平方向上相干长度测量值出现相对最大的频次最高, 其次为  $135^\circ$  方向, 再者为  $45^\circ$  方向, 最低的是铅直方向。水平出现最大的频率近 50%。相对一次测量的各个方向测量值的平均值而言, 每个方向上测量值的相对差别多在 10% ~ 30% 之间。由于相干长度较大对应的图像抖动方差较小, 测量结果表明铅直方向图像的抖动显然大于水平方向的抖动, 说明湍流有一定的各向异性特征, 这与文献 [11] 的结论是一致的。但对于一段测量时间内的各个方向测量值进行统计, 各个方向上的平均测量值之间的差别并不明显。

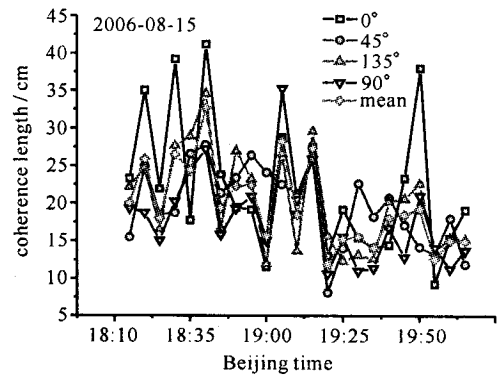


Fig. 3 Instantaneously measured coherence length

图 3 大气相干长度即时测量数值

### 4 结论

在天文选址过程中只关心良好的大气相干长度出现的频率, 从而在不同时间和地点之间有可比性。由于在统计上看, 各个方向的测量平均值之间区别不大, 因此采用双孔 DIMM 测量某一个方向上的相干长度值亦可满足需求。但仅仅采用两孔 DIMM 在一个方向上进行测量来计算相干长度是不能满足某些应用背景下的高精度需求的。实际上大气只能满足局地各向均匀同性的, 而且在较短的时间内才维持平稳性, 对其参数测量的统计时间尺度也是有限的, 而且通常较难以满足各态历经定理<sup>[10]</sup>。所以可以把每次测量的各个方向上的值作为随机的子样。当得到大气湍流的特征相关时间内的大量子样, 那么它们的均值相对单次测量或者某一个方向上测量而言, 应该是最能接近系综值的最佳估计。由于  $r_0$  本身会随时间起落, 为保持样本的平稳性, 统计一次  $r_0$  的时间不能太长, 采集数据时间必须小于大气湍流的特征相关时间<sup>[10]</sup>。因此若在大气特征相关时间内采集到大量图像, 然后分段计算得到大量的  $r_0$  测量值, 多个测量值的均值可以认为是大气湍流特征相关时间内最能接近系综值  $r_0$  的测量值。

我们研制的仪器具有结构紧凑、曝光时间短、图像帧频高并可以测量 4 组不同方向上的到达角起伏等优点。初步的测量结果表明, 到达角起伏并非各向同性。因此对于需要实时对大气湍流强度进行评估的场合, 如自适应光学、干涉成像等场合, 必须考虑到相干长度测量值的方向性, 仅采用两孔 DIMM 是难以满足这些应用背景的实际需求的。

### 参考文献:

- [1] 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. (Rao R Z. Light propagation in the turbulent atmosphere. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2005)
- [2] Martin H M. Image motion as measure of seeing quality [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1987, **99**: 1360-1370.
- [3] Sarazin M, Roddier F. The ESO differential image motion monitor [J]. *Astron Astrophys*, 1990, **227**: 294-300.
- [4] 谭徽松. 大气视宁度测量的一种方案 [J]. 云南天文台台刊, 1992, **1**: 11-14. (Tan H S. A proposal for the seeing measurement of site testing. *Publications of Yunnan Observatory*, 1992, **1**: 11-14)
- [5] 刘忠, 仇朴章, 邱耀辉, 等. 差分像运动视宁度测量实验 [J]. 云南天文台台刊, 1993, **4**: 22-30. (Liu Z, Qiu P Z, Qiu Y H, et al. Experiments on the differential image motion method for measuring the seeing. *Publications of Yunnan Observatory*, 1993, **4**: 22-30)
- [6] 谭徽松, 许骏, 岑学奋. 三孔较差视宁度监视仪的原理和误差分析 [J]. 云南天文台台刊, 1995, **4**: 39-44. (Tan H S, Xu J, Ling X F. The principle and error analysis of the DIMM with three sub-apertures. *Publications of Yunnan Observatory*, 1995, **4**: 39-44)
- [7] 仇朴章, 刘忠. 现代天文选址中的视宁度 II [J]. 天文学进展, 1996, **14**(3): 175-180. (Qiu P Z, Liu Z. Seeing in modern astronomical site testing II. *Progress in Astronomy*, 1996, **14**(3): 175-180)
- [8] 宋正方, 范承玉. 湍流外尺度对大气相干长度和等晕角的影响 [J]. 强激光与粒子束, 1994, **6**(3): 469-473. (Song Z F, Fan C Y. The effect of turbulent outer scale on atmospheric transverse coherence and isoplanatic angle. *High Power Laser and Particle Beams*, 1994, **6**(3): 469-473)
- [9] 汪建业, 刘晓春, 饶瑞中, 等. 大气相干长度的昼夜观测 [J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(1): 2-4. (Wang J Y, Liu X C, Rao R Z, et al. Measurement of atmospheric coherence length in daytime and at night. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(1): 2-4)
- [10] 王英俭, 吴毅, 龚知本. 大气湍流相干长度和 Strehl 比的统计特征 [J]. 光学学报, 1996, **16**(8): 1109-1113. (Wang Y J, Wu Y, Gong Z B.

The statistics of atmospheric coherence length and Strehl ratio. *Acta Optica Sinica* ,1996 ,**16**( 8 ) :1109-1113 )

- [ 11 ] 饶瑞中 ,王世鹏 ,刘晓春 ,等. 湍流大气中的激光束漂移的实验研究 [ J ]. 中国激光 ,2000 ,**27**( 11 ) :1011-1015.( Rao R Z , Wang S P , Liu X C , et al. Experimental study of spot dancing of laser beam in a turbulent atmosphere. *Chinese Journal of Lasers* ,2000 ,**27**( 11 ) :1011-1015 )
- [ 12 ] 马晓珊 ,朱文越 ,饶瑞中. 海面大气边界层中聚焦光束漂移各向异性的实验研究 [ J ]. 强激光与粒子束 ,2006 ,**18**( 6 ) 922-925.( Ma X S , Zhu W Y , Rao R Z. Anisotropy of beam wander of focused beam in atmospheric boundary layer above sea level. *High Power Laser and Particle Beams* ,2006 ,**18**( 6 ) 922-925 )
- [ 13 ] Roddier F. The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy[ J ]. *Progress in Optics* ,1981 ,**19** 281-376.
- [ 14 ] David B S , James J D , Bret F D. Exposure-time effects on differential measurements[ J ]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* , 1996 ,**108** 817-827.
- [ 15 ] Eun Oh , James L M , Jeffrey T B , et al. Developing a portable NRL fast frame seeing monitor[ C ]//Proc of SPIE. 2004 ,**5550** 70-78.

## Measurement of atmospheric coherent length by four-aperture differential image motion method

HUANG Hong-hua , YAO Yong-bang , RAO Rui-zhong

( Center for Atmospheric Optics , Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics ,  
Chinese Academy of Sciences , P. O. Box 1125 , Hefei 230031 , China )

**Abstract :** A new kind of angle of arrival fluctuation measurement by differential image motion method( DIMM ) is introduced. Fried parameter of two orthogonal base line directions can be obtained by angle of arrival fluctuation variance. The experiment results of horizontal propagation in the real atmosphere show that there are apparent differences between the four coherent length values , and the atmospheric turbulence is anisotropic. This characterization should be taken into account in applications. At least one of the measurement values of four directions is necessary for the analysis and study of determining the atmospheric coherence length.

**Key words :** Atmospheric turbulence ; DIMM ; Atmospheric coherent length ; Statistical characteristics