

大气相干长度的昼夜观测*

汪建业, 刘晓春, 饶瑞中, 龚知本

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽合肥 230031)

摘 要: 介绍了利用差分像运动测量法测量光波到达角起伏方差来确定大气相干长度的方法, 阐述了一种能对大气相干长度进行昼夜测量的日夜两用型大气相干长度仪的测量原理与结构, 经过长期昼夜观测分析得知: 整层大气湍流强度有随时间变化的趋势, 这种趋势与近地面层的湍流强度的时间变化特征基本吻合, 即在日出后和日没前两段内的相干长度值远大于其它时间段内的值。

关键词: 大气传输; 大气相干长度; 统计特征

中图分类号: TN246; O437 **文献标识码:** A

激光大气传输及自适应光学相位校正研究需要对大气湍流介质进行定量的描述。大气相干长度描述了整层大气传输路径上的综合湍流强度, 为分析激光在整层大气中的上行或下行传输提供基本的参数。

大气相干长度最初在天文观测中得到应用, 大气湍流引起的星光波前起伏使接收光学望远镜的实际分辨率与大气相干长度密切相关, 口径几 m 的望远镜的实际分辨率大致与口径为 10~20cm 的望远镜相似。通过自适应光学技术来校正大气湍流导致的波前起伏, 可提高光学望远镜的分辨率使之达到或接近衍射极限, 自适应光学系统的效率也与大气相干长度密切相关。因此大气相干长度对自适应光学系统的设计也是十分重要的。因此, 我们研制了一种既可以在白天又可以在夜晚观测的大气相干长度仪, 作为激光大气传输及相位校正研究的基本工具之一。

1 测量原理与方法

由于空间相位起伏所导致的空间相干性退化, 使得平行于平面波波阵面的接收孔径上仅在一个有限范围内呈现相位相干, 这个范围的尺度用横向相位相干长度或大气相干长度 r_0 来描述。波结构函数 $D(r)$ 与 r_0 的关系为^[1]

$$D(r) = 6.88(r/r_0)^{5/3} \quad (1)$$

当相干接收系统的接收孔径 $r=r_0$ 时, 波结构函数 $D(r)$ 的值为 6.88, 这时该系统的性能达到最佳极限。根据随机介质中波的传播理论, 对在地-空光程中传播的波长为 λ 的平面波, r_0 与大气折射率结构常数 $C_n^2(h)$ 的关系为

$$r_0 = \left\{ \frac{2.91}{6.88} k^2 \sec\varphi \int_{h_0}^{\infty} C_n^2(h) dh \right\}^{-3/5} \quad (2)$$

式中: $k=2\pi/\lambda$; φ 为天顶角; h_0 为观测点的高度。

如果我们直接测量 $C_n^2(h)$ 的垂直分布, 则可求出 r_0 , 这种做法通常称为湍流积分法。由于实时地获得整层 $C_n^2(h)$ 的垂直分布是相当困难的, 这种方法不能作为常规观测的手段。

湍流介质中光束的到达角起伏方差 δ_α^2 与 $C_n^2(h)$ 的关系同 r_0 与 $C_n^2(h)$ 的关系相似, 为

$$\delta_\alpha^2 = 2.91 D^{-1/3} \arccos\varphi \int_{h_0}^{\infty} C_n^2(h) dh \quad (3)$$

式中: D 为接收望远镜孔径。因此 r_0 与 δ_α^2 的关系为

$$r_0 = 3.18 k^{-6/5} D^{-1/5} \delta_\alpha^{-6/5} \quad (4)$$

所以 r_0 可以通过测量到达角起伏方差来获得, 这种方法通常称之为到达角法。

早期的到达角法测量是用照像拖影的办法来记录恒星在望远镜焦平面上的抖动, 因此只能获得一维抖动方差, 数据处理较为繁琐, 仪器本身带来的误差不易消除, 也不能实时给出结果。随着光电技术和计算机技术

* 收稿日期: 2003-04-15; 修订日期: 2003-07-21

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题。

作者简介: 汪建业(1966—), 男, 副研究员, 博士研究生, 从事大气湍流光学测量方法研究; 合肥 1125 信箱; E-mail: jywang@aiofm.ac.cn.

的高速发展,照像拖影法已逐渐被差分像运动测量法(DIMM)所取代。差分像运动测量法是将恒星通过光学系统在接收平面上形成两个星像,两星像中心位置之差 $\Delta\rho_c$ 与 r_0 的关系为^[2]

$$r_0 = \left\{ \frac{2f^2 [0.36(\lambda/D)^{1.3} - 0.242(\lambda/d)^{1.3}] \lambda^{2.3}}{\langle \Delta\rho_c^2 \rangle - \langle \Delta\rho_c \rangle^2} \right\}^{3.5} \quad (5)$$

式中: f 为望远镜焦距; d 为两光学接收镜的中心间距。这种方法对测量仪器本身的抖动、接收系统的光学质量、望远镜焦距的温度效应以及星像亮度的起伏等因素都是不敏感的,因而可望获得良好的测量精度。利用计算机自动控制和 CCD 成像技术能够实时地测量 $\Delta\rho_c$ 并进行处理,因而可以对 r_0 进行实时观测。

我们研制的这台大气相干长度仪就是利用差分像运动测量法测量光束的到达角起伏方差来确定大气相干长度 r_0 的。以往的同类测量仪器分别适用于夜晚和白天,而此台仪器将两种功能集于一体,既能用于夜晚观测,也能用于白天观测。晚上观测时,以恒星作为光源;在白天则以太阳的边缘作为光源^[6]。

2 仪器结构和操作

大气相干长度仪分成光学接收、光电转换系统和数据处理系统两大部分。前者包括卡塞格林式接收光学望远镜、光学成像系统和用于到达角起伏测量的 CCD 摄像机。这一部分安装在光学望远镜上,可以由自动或手动对要观测的恒星或太阳在赤经、赤纬两维方向上进行搜索和跟踪。后者包括视频信号采集卡、A/D 采集卡、计算机和数据处理软件。

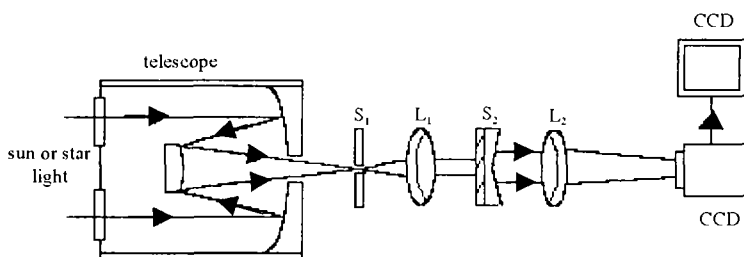


Fig. 1 Optical schematic diagram of coherence length monitor

图 1 大气相干长度仪光学原理图

仪器的光学原理如图 1 所示。白天观测时,将望远镜(口径为 30cm)瞄准并跟踪太阳,并在望远镜前端面的两口径为 10cm 子瞳光阑(两子瞳间距为 20cm)上放置两个衰减片。太阳经衰减后成像聚焦在狭缝光阑 S_1 上,调节合适的狭缝距离,这样利用狭缝光阑取得太阳的一条带边缘的亮线,通过由透镜 L_1 , 光劈 S_2 和透镜 L_2 组成的光束分离器成像在 CCD 靶面上,为两条亮线。晚上观测时,望远镜直接利用一颗亮度和位置合适的恒星(一般采用二、三等星)进行跟踪测量,星光通过望远镜端面的两子瞳光阑(没有放置衰减片),成像聚焦在狭缝光阑 S_1 处(此时狭缝距离最大),再经过光束分离器成像在 CCD 的靶面上,形成两个星像。计算机利用不同的界面,针对白天和晚上所测量的情况,通过数据的采集和处理系统,分别利用太阳亮线边缘纵向的抖动和两星像重心相对位置的变化,取其相对运动的方差 $\Delta\rho_c$ 进行计算。

仪器中使用的 CCD 相机型号为 MTV-2821CB,最低照度 0.02 LUX,像素尺寸为 $8.06\mu\text{m} \times 8.30\mu\text{m}$,具有低照度响应、高信噪比的特点,从而可以用较弱亮度的星体作为观测目标。在进行 r_0 测量时,为解决计算机内存容量不足和计算时间过长等问题,考虑到星像在 CCD 靶面上只占有限的空间,即有效的数据信号在 CCD 视频输出的每帧信号中只是一个部分,我们在采集处理大气相干长度的观测数据时(采集速率为 25 帧每秒,每次采集 20s 的数据),采用了开窗口的方式。窗口的大小兼顾星像抖动的范围、机械系统的跟踪调节精度和每组数据所需的观测时间等因素。

3 初步观测结果

我们在白天和晚上对整层大气相干长度分别进行了观测,由于太阳与恒星的位置在变,所得大气相干长度值对应于斜程传播路径,为进行统计比较分析,应将斜程路径上的相干长度转换为垂直路径上的整层大气相干长度。白天大气相干长度的变化范围如图 2 所示,夜间大气相干长度的变化范围如图 3 所示。白天相干长度的时间变化最明显的特征在于日出后和日没前相干长度值明显大于其它时间内的值,一般都在 10cm 以上,有时可高达 20cm。

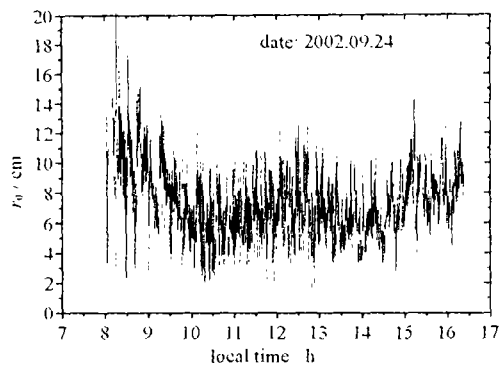
Fig. 2 Variation of r_0 during the day

图 2 白天大气相干长度的时间变化

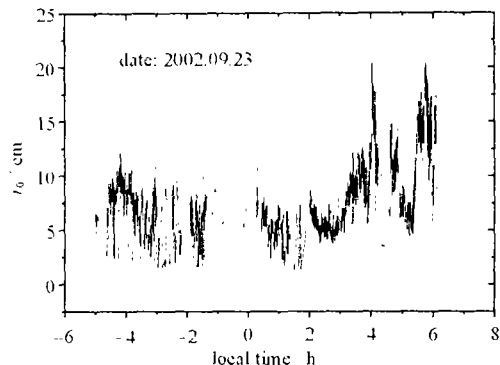
Fig. 3 Variation of r_0 at night

图 3 晚上大气相干长度的时间变化

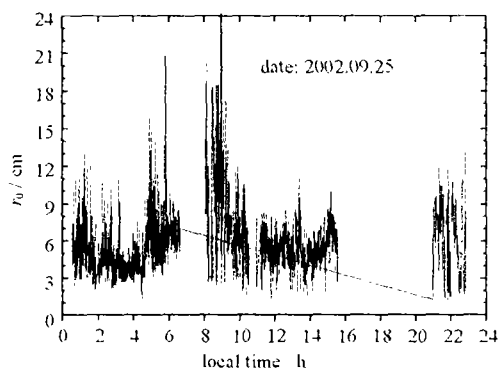
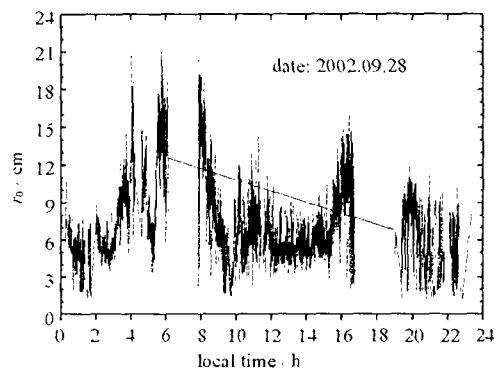
Fig. 4 Variation of r_0 for a whole day

图 4 全天大气相干长度的时间变化



白天和晚上的通宵观测获得了大气相干长度全天的变化情况,当然在日出和日没时分观测不能连续进行,所得数据存在断点。大气相干长度全天的时间变化示于图 4。可以看出,尽管在日出和日没时分缺乏数据,但白天和夜晚在此期间附近的相干长度的变化趋势显示了在这两个区间内存在最大值。

4 讨论与结论

国际上已有多种大气湍流高度分布廓线模型,被广泛应用在湍流大气中光传播效应的分析计算中。这些模型包括不区分日夜的笼统模型,如 Hufnagel-Valley 5/7 模型,AFGL AMOS 模型。其中 HV5/7 模型应用最为广泛,根据此模型,整层大气的相干长度为 5cm。另一些模型分别描述白天和夜晚的大气湍流廓线,如 SLC-Night, CLEARI Night 模型是夜间模型,SLC Daytime 是白天模型^[7]。

这些模型暗示白天或夜晚的湍流状态在统计意义上是均匀的、随时间的变化不大。但白天大气边界层湍流强度具有显著的时间变化特征,即在日出后和日没前的两段时间内远远小于其它时间段内的值;而湍流强度随高度有迅速降低的变化趋势,所以近地面层的湍流强度在整层湍流强度中具有较大的分量^[6]。因而,近地面层的湍流强度的时间变化会引起整层湍流强度的明显变化。

我们的测量结果明确地证明了整层湍流强度 C_n^2 有随时间变化的趋势,这种趋势与近地面层的湍流强度的时间变化特征基本吻合,即在日出后和日没前的两段时间内的相干长度值远大于其它时间段内的值。

参考文献:

- [1] Fried D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures[J]. *J Opt Soc Am*, 1966, 56: 1372.
- [2] Sarazin M, Roddier F. The ESO differential image motion monitor[J]. *Astron Astrophys*, 1990, 227: 294-300.
- [3] 宋正方, 杨高潮, 刘晓春, 等. 云南天文台大气视宁度测量[J]. 量子电子学报, 1997, 14(1): 68-74. (Song Z F, Yang G C, Liu X C, et al. Measurements of atmospheric seeing in Yunnan Observatory[J]. *Chinese J Quantum Electron*, 1997, 14(1): 68-74)
- [4] 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]. 云南天文台刊, 1995, (4): 39-44. (Tan H S, Xu J, Qin X F. The principle and error analysis of the DIMM with three sub-apertures[J]. *Publications of Yunnan Observatory*, 1995, (4): 39-44)

- [5] 吴晓庆,马成胜,王英俭,等. 近地面折射率结构常数的长期测量和统计分析[J]. 强激光与粒子束,2002,14(4):551—556. (Wu X Q, Ma C S, Wang Y J, et al. Long-term measurements and statistics study on refractive index structure parameter of surface layer. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(4):551—556)
- [6] Brandt P N, Mauter H A, Smartt R. Day-time seeing statistics at sacramento peak observatory[J]. *Astron Astrophys*, 1987, 188:163—168.
- [7] Smith F G. Atmospheric propagation of radiation Volume 2[M]. Washington:SPIE Optical Engineering Press, 1993. 217—224.

Measurement of atmospheric coherence length in daytime and at night

WANG Jian-ye, LIU Xiao-chun, RAO Rui-zhong, GONG Zhi-ben

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

Abstract: The principle of atmospheric coherence length measurement via differential image motion measure of the optical wave's angle-of-arrival fluctuation is introduced. An instrument for the measurement of atmospheric coherence length both in the daytime and at night were described. The statistical characteristics of the atmospheric coherence length in the daytime and at night were analyzed from some primary observation results. It shows that the refractive index structure constant varies with the time in total layer, and the time-varying behavior is basically in accordance with that of the boundary layer, that is, the atmospheric coherence length during the period of sunrise and sundown is much larger than that in the other periods.

Key words: Atmospheric transmission; Atmospheric coherence length; Statistical characteristics

* * * * *

重 要 声 明

为适应我国科技期刊信息化建设需要,扩大作者的学术交流渠道,推进科技信息交流的网络化进程,《强激光与粒子束》刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、中国期刊网(<http://qjgy.chinajournal.net.cn>)、万方数据库——数字化期刊群(<http://new.wanfangdata.com.cn>)、中文科技期刊数据库(<http://www.cqvip.com>),进入因特网提供信息服务。本刊所付稿酬包含刊物内容上网服务报酬。作者如不同意将文章编入以上数据库,请在来稿时声明,编辑部将做适当处理。

《强激光与粒子束》编辑部

2004年1月1日