

文章编号: 1007-5461(2005)03-0477-04

# 斜程路径大气相干长度的测量

汪建业, 刘晓春, 翁宁泉, 吴毅

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 介绍了一种斜程有限距离上大气相干长度的测量系统和方法, 用系留气球搭载一个点光源, 在地面用差分像运动测量法测量光波到达角起伏方差来确定实时的斜程大气相干长度值, 与湍流廓线测量实验进行了对比, 实验结果分析光学湍流廓线积分与相干长度仪测量二者的相关性较好。

**关键词:** 大气光学; 大气传输; 大气相干长度; 斜程测量

**中图分类号:** TN246; O437 **文献标识码:** A

## 1 引言

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。激光在整层大气上行或下行传输过程中, 大气相干长度提供了传输路径上的综合湍流强度, 为分析作用面上的光强分布特征提供基本的参数。所以大气相干长度是表征大气湍流强度、用于激光大气传输以及自适应光学研究的重要参量。以前, 测量大气相干长度皆以大气外界天体作为光源进行测量, 这样获得的大气相干长度为描述整个大气的量, 但在实际激光工程应用中, 希望获得天空中有限距离内的相干长度值, 这对测量方法提出了挑战。本文提出了一种利用光波到达角起伏的原理测量斜程路径上的大气相干长度的方法, 可以测量陆地观测点与空中气球 (一定的放飞高度) 上信标光之间斜程有限距离上的大气相干长度值。

## 2 光波到达角起伏测量大气相干长度的原理与方法

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。Fried 研究了波前相位起伏的结构函数  $D_\varphi(r)$ , 引入了大气相干长度的概念<sup>[1]</sup>, 其定义为

$$D_\varphi(r) = 6.88 \left( \frac{r}{r_0} \right)^{5/3}. \quad (1)$$

当相干系统的接收孔径  $r = r_0$  时, 波结构函数的值  $D_\varphi(r)$  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  $\lambda$  的光波, 与大气折射率结构常数  $C_n^2(h)$  的关系为

$$\begin{cases} r_0 = \left[ 0.423k^2 \int_{h_0}^{\infty} C_n^2(h) dh \right]^{3/5}, \text{平面波} \\ r_0 = \left[ 0.423k^2 \int_{h_0}^{\infty} C_n^2(h) \left( \frac{h}{L} \right)^{5/3} dh \right]^{3/5}, \text{球面波} \end{cases}, \quad (2)$$

(2) 式中  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $h$  是垂直高度,  $L$  为总的光程。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。

湍流介质中平面光束的到达角起伏方差  $\delta_a^2$  与  $C_n^2(h)$  的关系同  $r_0$  与  $C_n^2(h)$  的关系相似

$$\delta_a^2 = 2.91 D^{-1/3} \cos^{-1} \phi \int_{h_0}^{\infty} C_n^2(h) dh. \quad (3)$$

基金项目: 国家 863 高技术计划资助课题

收稿日期: 2003-12-17; 修改日期: 2004-02-13

E-mail: jywang@aiofm.ac.cn

(3) 式中  $D$  为接收望远镜口径, 因此  $r_0$  与  $\delta_\alpha^2$  的关系为

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

所以  $r_0$  可以通过测量到达角起伏方差来获得。差分像运动测量法 (DIMM) 是将信标光通过光学系统在接收平面上形成两个像, 两像中心位置之差  $\Delta\rho_c$  与  $r_0$  的关系为

$$r_0 = \left\{ \frac{2f^2(\lambda/D)^{1/3} - 0.24(\lambda/d)^{1/3} \lambda^{5/3}}{\langle \Delta\rho_c^2 \rangle - \langle \Delta\rho_c \rangle^2} \right\}^{3/5}, \quad (5)$$

(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信标光源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 and 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  $r_0$  进行试验观测。经过参数变换, 可以利用球面波直接测量斜程大气相干长度值。

### 3 斜程测量大气相干长度的方法

为了确定地面观测点与空中系留气球 (一定的放飞高度) 之间斜程有限距离上的大气相干长度值, 我们利用图 1 所示的斜程路径大气相干长度值测量实验系统, 利用双点差分到达角法原理来测量。

整个实验系统分成信标光源, 光学接收、光电转换系统和数据处理系统三大部分。信标光源是在系留气球上搭载一个点光源, 采用了无方向性的碘钨灯作为信标光, 系留气球的放飞高度为 120 m。光学接收、光电转换系统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 MTV-2821CB 型 CCD 摄像机。这一部分测量装置安装在光学望远镜上, 可以自动或手动对要观测的信标光源进行搜索和跟踪。这些是我们原有的利用双点差分像运动 (DIMM) 来测量的大气相干长度仪的主要组成部分, 安置在离系留气球 3 km 的地方, 高度约 5 m。数据处理系统包括视频信号采集卡、计算机和数据处理软件。

由于空中气球上信标光会跟随大气风速、风向的变化而产生漂移, 所以实时跟踪和在接收望远镜成像测量有一定的难度。在进行斜程  $r_0$  测量时, 必须改进光学成像系统, 扩大光学成像视场。自动或手动对要观测的信标光源进行搜索和跟踪, 使得信标光通过光学系统在 CCD 摄像机接收靶面上形成的两个像停留一定的时间 (6 秒钟)。图像信号处理过程如下: CCD 摄像机输出的图像信号首先通过视频图像采集卡采集, 采集速率为 25 帧 / 秒, 每次采集 6 秒钟 150 帧的图像数据, 存入计算机内存。然后利用图像处理软件逐帧求出每幅图像中两个信标光像的重心位置坐标, 并得到  $\Delta\rho_c$ , 经处理最后利用 (5) 式计算得到斜程大气相干长度值  $r_0$ 。图 2 所示是我们采集的某一帧 CCD 图像信号, 从图中可以明显观察到信标光源在 CCD 摄像机接收靶面上形成的两个像。

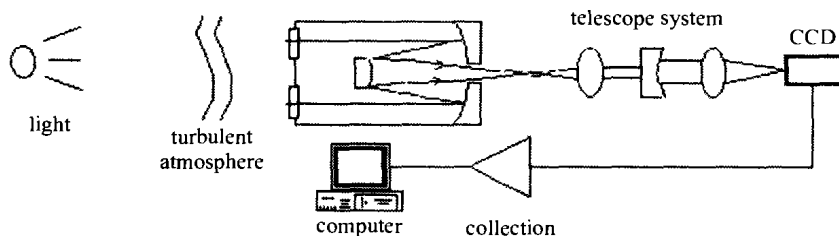


Fig.1 Configuration of the experiment of coherence length monitor

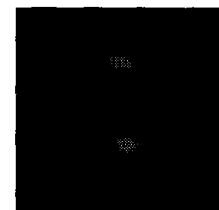


Fig.2 The picture with CCD camera

本实验同时适合白天和夜晚观测, 因为白天观测时, 需要在接收望远镜两个入射光瞳上放置衰减片, 以便滤去白天的背景光和杂散光, 但同时对空中气球上信标光强也产生了衰减。所以仪器中使用的 CCD 相机具有低照度响应、高信噪比, 大接收靶面的特点, 可以适用于较弱亮度的移动光源作为观测目标。

### 4 与湍流积分法的对比实验

在测量斜程大气相干长度的同时, 我们进行了湍流廓线测量, 用以对比验证有限高度下斜程大气相干长度的直接测量和用光学湍流廓线计算相干长度这两种方法, 以检验二者的相关性。

对比测量实验设备构成如下: 在相干长度的直接测量部分, 系留气球搭载一个点光源, 采用了无方向的碘钨灯, 系留气球的高度为 120 m, 相干长度仪安置在离系留气球 3 km 的地方, 高度约 5 m; 湍流廓线测量部分, 在系留气球场地附近 (约 30 m) 有一 36 m 高测量铁塔, 在铁塔上安装了多层温度脉动仪测量折射率结构常数, 高度分别为: 7 m、12 m、18 m、28 m、36 m, 在系留气球场地和相干长度测量点之间离系留气球场地 1 km 处安置一台多普勒声雷达 (其声波指向远离光学通道, 盲区约 30 m), 用以测量铁塔高度以上的折射率结构常数廓线  $C_n^2(h)$ 。

对于廓线积分, 由于光路是倾斜的, 可以近似地假定折射率结构常数是水平均匀的, 这样 (2) 式中球面波的积分公式可以转化为

$$r_0 = \left[ 0.423k^2 \int_0^H C_n^2(h) \left( \frac{H-h}{H} \right)^{5/3} \frac{dh}{\cos \alpha} \right]^{-3/5} \quad (6)$$

这里  $h$  是垂直高度,  $H$  点光源的垂直高度,  $\alpha$  是光路的仰角。我们可以通过测量沿光路折射率结构常数的分布, 利用 (6) 式来计算光路的大气相干长度。铁塔和声雷达测量在实验时间段中连续测量, 分别采用了 5 分钟平均来得到一条平均廓线, 再计算得到大气相干长度值, 其统计时间与大气相干长度仪测量一组到达角起伏所用的时间间隔大致相当。

## 5 实验结果与分析

对比实验共进行了 4 天, 在光源亮度与天空背景光亮度的对比度合适, 成像效果较好的情况下, 可以得到有效的对比实验测量结果。

图 3 给出了其中一天的测量结果对比。可以看到相干长度仪和光学湍流廓线积分的结果其量级和时间变化趋势基本一致, 白天时段 15:00-16:30 期间相干长度较短, 小于 10 cm; 16:30 以后随着日落太阳辐射减弱, 进入了所谓日落日出的“转换时刻”<sup>[6,7]</sup>, 这时由于湍流减弱, 相干长度相应地变长, 到 17:30 左右超过了 20 cm; “转换时刻”以后, 随着湍流增强, 相干长度再变短, 但平均会比白天的略长。这种时间变化特征与通常的大气边界层中折射率结构常数观测与研究结果是一致的, 同时两种方法的结果符合较好, 这样两种方法相互得到了验证。

进一步分析实验结果见图 4, 选取后两天的测量结果, 抽取廓线测量结果与相干长度结果时间一致的数据, 画出散点图可以看到二者的相关较好, 相关系数达到 85.7%, 图中拟合直线的斜率为 1.02, 截矩为 2.17 cm。这样得到的结论是, 光学湍流廓线积分与相干长度仪测量二者相关较好, 光学湍流廓线系统偏长约 2 cm。

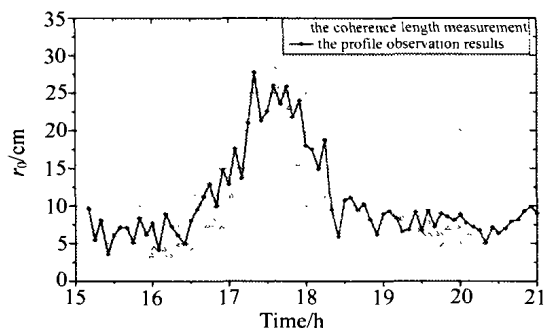


Fig.3 Comparison of the time variation of  $r_0$  by experimental measure and simulation integral

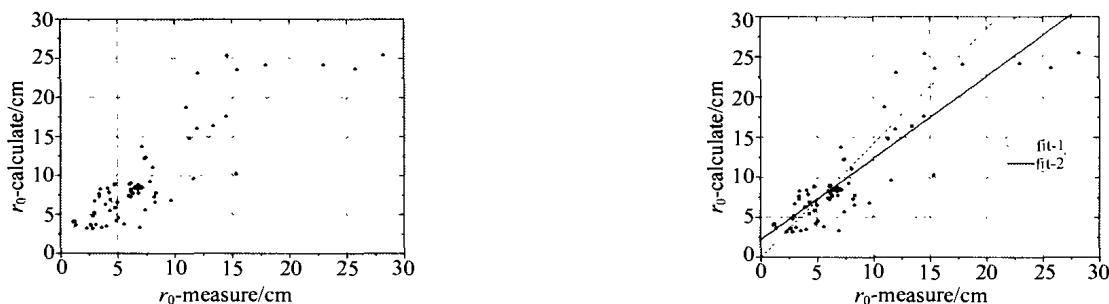


Fig.4 Compared figure of simulation result

本文提出的有限高度下斜程大气相干长度测量的方法先进, 技术新颖, 成功地解决了有限高度上相干长度的测量问题, 对激光大气传输的工程应用具有重要的意义。

## 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] Wang Shipeng, Rao Ruizhong, Liu Xiaochun. Statistical properties of laser irradiance scintillation in a real turbulent atmosphere throughout a year [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, 19(3): 390-397 (in Chinese).
- [4] Song Zhengfang, Yang Gaochao, et al. Measurements of atmospheric seeing in yunnan observatory [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 1997, 14(1): 68-74 (in Chinese).
- [5] Tan Huisong, Xu Jun, Qin Xuefeng. The principle and error analysis of the DIMM with three sub-apertures [J]. *Publications of Yunnan Observatory* (云南天文台台刊), 1995, (4): 39-44 (in Chinese).
- [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* [M]. Volume2 Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1993. 217-224.
- [8] Wang Jianye, Liu Xiaochun, Rao Ruizhong, et al. The measurement of atmospheric coherence length in daytime and night [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 2004, 16(1): 1-5 (in Chinese).

## Measurement of atmospheric coherence length along bevel propagation path

WANG Jian-ye, LIU Xiao-chun, WENG Ning-quan, WU Yi

( Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China )

**Abstract:** An instrument for the measurement of atmospheric coherence length is described. There is a light beacon on the captive balloon, atmospheric coherence length along bevel propagation path are measured via differential image motion measure angle-of-arrival fluctuation of optical wave. In addition, the profile observation results are used to check the results of the atmospheric coherence length measurement, and they are consisted quantitatively.

**Key words:** atmospheric optics; atmospheric transmission; atmospheric coherence length; bevel propagation path

**作者简介:** 汪建业 (1966, 8), 男, 副研究员, 硕士生导师, 从事大气湍流光学测量方法研究和仪器的研制工作。

~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~

(上接封二)

### • 纤维与波导光学

- |                                 |                             |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 波长变换对光突发交换网络性能的影响 .....         | 仇英辉, 纪越峰, 徐大雄 (446)         |
| 一种新的二维无线光 CDMA 编码与实现 .....      | 解宜原, 荣健 (449)               |
| 初始啁啾对光纤中传播的飞秒光孤子的影响 .....       | 杜建新, 楼祺洪, 陈雷, 孔令峰, 周军 (453) |
| 光纤中非线性阻尼对类明孤子传输特性的影响 .....      | 谢应茂, 曾春香, 王形华 (457)         |
| 宽带超荧光光纤光源的设计与实验 .....           | 孙昕, 张贵忠, 张良 (461)           |
| 初始啁啾对色散渐减光纤中皮秒脉冲孤子效应压缩的影响 ..... | 赵春梅, 杨性愉 (464)              |

### • 大气光学与遥感

- |                                 |                          |
|---------------------------------|--------------------------|
| 等角度与等时间采样控制技术在扫描成像系统中应用研究 ..... | 简献忠, 张会林, 王朝立, 裴云天 (468) |
| 厦门海域气溶胶光学特性的观测研究 .....          | 麻金继, 杨世植, 张玉平 (473)      |
| 斜程路径大气相干长度的测量 .....             | 汪建业, 刘晓春, 翁宁泉, 吴毅 (477)  |