

文章编号: 0258-7025(2005)01-0064-03

大气相干长度的对比实验研究

汪建业, 饶瑞中, 刘晓春

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要 大气相干长度是在激光大气传输和自适应光学研究中对大气湍流介质进行定量描述的重要参量。介绍了利用激光大气闪烁测量反演大气相干长度和利用差分像运动测量法(DIMM)测量光波到达角起伏方差来确定大气相干长度的两种不同测量方法,并根据光波到达角起伏和激光大气闪烁这两种不同方法测量大气相干长度的仪器,在相同的近地面传播路径上进行对比实验观测,两者测量结果有时存在一定的偏差,但其量级和时间变化趋势基本一致,这两种测量方法相互得到了验证。最后还对实验观测结果进行了讨论,分析了误差产生的原因。

关键词 大气光学;大气相干长度;对比实验;测量

中图分类号 P 427.1 **文献标识码** A

Comparison of Experimental Study of Atmospheric Coherence Length

WANG Jian-ye, RAO Rui-zhong, LIU Xiao-chun

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

Abstract The atmospheric coherence length is a very important parameter of atmospheric propagation and adaptive optics. The principle of atmospheric coherence length measurement via differential image motion measure (DIMM) angle-of-arrival fluctuation of optical wave and the measurement method dealing with the irradiance scintillation of laser propagation are introduced. The atmospheric coherence length along level propagation path is measured via differential image motion measure angle-of-arrival fluctuation of optical wave. In addition, the measurement systems dealing with the irradiance scintillation of laser propagation are used to check the results of the atmospheric coherence length measurement, and its time variation is similar, but they can be much different from each other under other conditions. Last, various errors caused by instrument are analyzed and discussed.

Key words atmospheric optics; atmospheric coherence length; comparison of experimental; measure

1 引言

大气相干长度最初是在天文观测中得到应用的。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,口径几米的望远镜的实际分辨率大致与口径为 10~20 cm 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。大气相干长度对大气湍

流介质进行了定量的描述,是用于激光大气传输以及自适应光学研究的重要参量。大气相干长度提供了激光在整层大气上行或下行传输过程中传输路径上的综合湍流强度。

为了进一步验证我们研制的可以在白天和夜晚观测的大气相干长度仪测量数据的可靠性,根据光波到达角起伏和激光大气闪烁这两种测量大气相干长度的原理方法,利用各自的测量仪器同时在相同的近地面传播路径上进行对比实验观测。

收稿日期: 2003-08-18; **收到修改稿日期**: 2004-02-24

基金项目: 国家 863 计划(2002AA861062)资助项目。

作者简介: 汪建业(1966—),男,中国科学院安徽光学精密机械研究所副研究员,硕士生导师,从事大气湍流光学测量方法和仪器的研究工作。E-mail: jywang@aiofm.ac.cn

2 激光大气闪烁测量实验系统

在弱起伏条件下,当传播路径均匀时,闪烁均方差与湍流折射率结构常数 C_n^2 存在确定的比例关系。当湍流内尺度远小于菲涅耳衍射尺度时,波数为 k 的球面波在传播距离处光强的归一化均方差 σ_I^2 可以用 Rytov 数 β_0^2 表述为

$$\sigma_I^2 = \beta_0^2 = 0.5k^{7/6}L^{11/6}C_n^2, \quad (1)$$

式中 L 为总的光程。

因此,利用闪烁均方差测量传播路径上的等效平均湍流强度是一种直接、有效的方法。在弱起伏条件下,闪烁饱和没有出现时,(1)式可以作为利用点闪烁均方差反演湍流强度 C_n^2 的基础^[1]。湍流大气中大气相干长度 r_0 与大气折射率结构常数 $C_n^2(h)$ 的关系为

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

其中 $k = 2\pi/\lambda, h$ 为垂直高度。

所以在弱起伏条件下,可以测量 σ_I^2 ,利用(1)式反演湍流强度 C_n^2 ,再利用(2)式计算出大气相干长度值 r_0 。

实验系统如图 1,所用光源是波长为 0.6328 μm ,输出功率 30 mW 的 He-Ne 基模激光,激光通过 1000 m 湍流大气后,经 0.35 mm 小孔及干涉滤光片,入射到光电倍增管上,信号通过放大并经 A/D 转换后由计算机以 2000 Hz 的采样速率实时采集^[2,3]。为测得背景及探测器件本身噪声的影响,在激光器前安置了遥控遮光器。

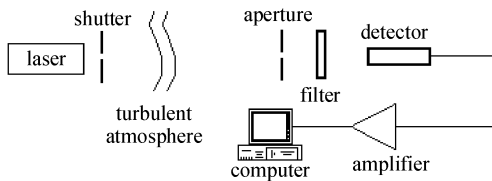


图 1 闪烁测量实验系统装置图

Fig. 1 Configuration of the experiment of the scintillation

每次实验持续 24 h,每 2 min 进行一次。实测时,每次先由计算机发出指令,遥控遮光器通过无线接收装置使遮光器工作,将激光遮蔽,进行 8 s 的背景噪声测试,同时将所测数据存盘;而后遮光器停止工作,将激光打开进行 35 s 的信号采样,并同时将

数据存盘。然后利用程序计算出光强的归一化均方差值 σ_I^2 ,反演湍流强度 C_n^2 ,最后计算出大气相干长度值 r_0 ^[4]。

3 大气相干长度仪测量实验系统

湍流介质中平面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^[5]

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

其中 D 为接收望远镜口径, ϕ 为天顶角, h_0 为观测点的高度。因此 r_0 与 δ_α^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,两星像间连线方向的像运动方差(抖动量) σ^2 与 r_0 的关系为^[6]

$$r_0 = \left\{ \frac{2f^2 [0.36(\lambda/D)^{1/3} - 0.242(\lambda/d)^{1/3}] \lambda^{5/3}}{\sigma^2} \right\}^{3/5}, \quad (5)$$

其中 $\sigma^2 = (\bar{b}_i^2 - \bar{b}_i^2)$,

$$\bar{b}_i^2 = (\sum b_i^2)/N, \quad \bar{b}_i^2 = (\sum b_i/N)^2,$$

其中 b_i 为第 i 幅图两星像间的距离, 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和 CCD 成像技术能够实时地测量 b_i 并进行处理,因而可以对 r_0 进行试验观测。

日夜两用的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^[7]。整个仪器分成光学接收、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(Cassegrain)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

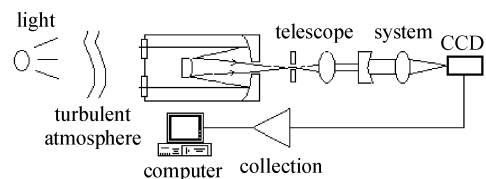


图 2 大气相干长度仪实验系统

Fig. 2 Configuration of the experiment of coherence length monitor

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。

图 2 所示为大气相干长度仪测量实验系统。所用光源是无方向性的碘钨灯, 信标光源通过 1000 m 湍流大气后, 通过接收望远镜成像测量。

4 对比实验结果与分析

利用上述的两套测量仪器系统同时在相同的近地面传播路径上(1000 m 水面)进行对比实验观测, 实验一共进行了一个星期, 期间由于天气的原因有暂停。图 3 给出一天的实验结果, 虚线为大气相干长度仪测量结果, 实线为激光大气闪烁测量反演大气相干长度的结果。

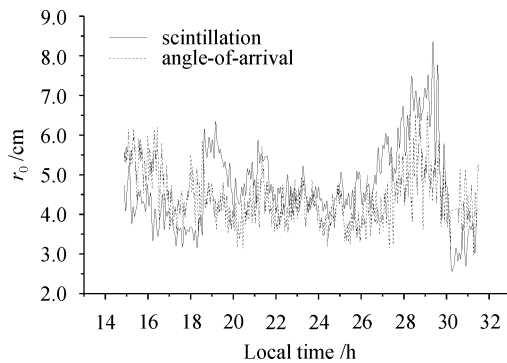


图 3 2002 年 11 月 20 日对比实验测量结果

Fig. 3 Time variation of r_0 which are retrieved from the scintillation and angle-of-arrival on 20 November 2002

从图 3 实验结果可以看出, 两者测量结果有时存在一定的偏差, 但其量级和时间变化趋势基本一致, 这两种测量方法相互得到了验证。数值上存在一定偏差的原因, 分析认为:

1) 大气中激光闪烁效应理论与实验研究的差异在于: 理论上, 基于空间与时间上点的激光强度起伏; 实验中, 所研究的激光强度是通过一定尺度探测口径且经过一定探测响应时间后得到的。为减小差异, 只有使用探测口径足够小、探测响应速率足够高的测试系统, 而这样势必会降低信噪比, 影响实验数据可靠性。而且在实验测试时, 背景及探测器本身噪声总是叠加于实测信号中, 该噪声白天夜晚明显不同, 同时白天中也会因气象要素瞬间变化(如云)而变化, 这一点在图 3 实验数据中可以明显反映出

来。另外, 探测器件饱和效应(被探测激光功率的稳定性引起)对实验精度也有很大的影响。

大气相干长度仪可能存在的主要测量误差来源是: 由于使用的 CCD 摄像机性能的局限, 未能将光到达角起伏信号中的频谱分量完全覆盖。从抖动的频谱来看, 高频分量($\nu > 10$ Hz)已相当微弱, 低的采样速率未必会造成很大的误差, 但低频分量($\nu < 0.2$ Hz)照顾不足却可能会引入较大的误差。

2) 激光大气闪烁测量的是大气湍流对光束引起的强度起伏, 所用光源是相干光源。而大气相干长度仪测量的是大气湍流对光波引起的相位变化, 造成的波阵面随机倾斜现象——到达角起伏, 所使用信标光源是球面波光源。大气湍流对这两种不同光束产生的影响, 可能会造成数值上的差异, 但在由于大气湍流强度引起的时间变化趋势上应该是基本一致的。这一点在我们的实验数据中得到了很好的验证。

参 考 文 献

- 1 Rao Ruizhong, Gong Zhibeng, Wang Shipen *et al.*. Aperture averaging of saturated scintillation of laser propagation in the atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1):36~40
饶瑞中, 龚知本, 王世鹏 等. 激光大气闪烁饱和的孔径平均效应 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(1):36~40
- 2 Rao Ruizhong, Wang Shipeng, Liu Xiaochun. Atmospheric-turbulence-degraded light intensity images: size measurement and description of deformation characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(4):451~456
饶瑞中, 王世鹏, 刘晓春. 被湍流大气退化的激光光斑: 尺度测量与形变特征描述 [J]. *光学学报*, 1998, **18**(4):451~456
- 3 Rao Ruizhong. Pattern characteristics of collimated laser beam in a turbulent atmosphere I. Characteristic radii [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10):889~894
饶瑞中. 湍流大气中准直激光束的光斑特征 I. 特征半径 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10):889~894
- 4 Wang Shipeng, Rao Ruizhong, Liu Xiaochun. Experimental observation of laser scintillation effect in real atmosphere [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, **25**(6):120~123
王世鹏, 饶瑞中, 刘晓春 等. 实际大气中激光闪烁效应的实验观测 [J]. *光电工程*, 1998, **25**(6):39~44
- 5 D. L. Fried. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**:1372~1380
- 6 M. Sarazin, F. Roddier. The ESO differential image motion monitor [J]. *Astron. and Astrophys.*, 1990, **227**(1):294~300
- 7 Wang Jianye, Liu Xiaochun, Rao Ruizhong *et al.*. Measurement of atmospheric coherence length in daytime and night [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(1):1~4
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):1~4