

文章编号: 1001-4322(2006)11-1769-05

激光雷达大气湍流测量方法研究*

戴 阳^{1,3}, 林兆祥², 张文艳², 程学武¹, 李发泉¹, 宋述燕², 龚顺生¹

(1. 中国科学院 武汉物理与数学研究所, 武汉 430071;

2. 中南民族大学 电信学院, 武汉 430074; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100080)

摘 要: 报道了一种用激光雷达方法测量大气湍流的技术, 利用发射激光束在空间所需位置产生一个聚焦光斑, 通过此光斑处的大气分子瑞利散射机制形成一个空间的人造散射光源, 接收系统对此光源的散射光进行探测, 测量出从地面到此空间散射光源之间的大气湍流参数。给出了对武汉上空大气湍流测量的初步结果。得到了不同高度层的大气相干长度随时间的变化特性、平均值和起伏均方差, 并对实验测量和模型计算的大气折射率结构常数在相应高度段的积分值进行了比较, 二者积分值都在 10^{-12} 量级, 得到的结果基本相符。这种测量方法的实现, 为测量空间不同方位、不同距离的大气湍流提供了一种新的手段。

关键词: 大气湍流; 激光雷达; 大气相干长度; 差分像点移动

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

大气湍流对光传播的影响, 最早反映在天文观测中。由于大气湍流使星光通过大气时产生光强起伏和相位起伏, 进而使观测到的星像模糊。由于大气湍流的影响, 望远镜的分辨率从大约 λ/d 降为 λ/r_0 , d 为望远镜的口径, r_0 为大气相干长度。大气湍流使 r_0 通常在几 cm 到几十 cm。因此湍流的影响严重地限制了大口径天文望远镜分辨率的提高。特别是激光雷达技术、激光大气传输和自适应光学等领域的发展, 促使人们对大气湍流特性进行广泛地测量与研究^[1-2]。

在诸多大气湍流测量方法中, 光学测量方法最为常用^[3-6]。光学测量方法是通过检测接收光强的闪烁或接收光点的抖动来获得大气湍流参数。但在大多数的光学湍流测量方法中, 所用的光源均为自然光源, 如星光、日光等。如利用人工光源, 则一般只能测量水平路径上的大气湍流。近年来, 随着激光通信、空间目标监测和自适应光学等现代光学技术的发展, 要求对空间不同方位不同距离内的大气湍流进行测量。由此我们提出用激光雷达方法测量大气湍流, 该技术能基本满足这些研究领域的需求, 克服了传统光学测量方法受自然光源位置的限制。本文即介绍激光雷达方法湍流测量的原理、技术和初步的测量结果。

1 测量原理

激光雷达大气湍流测量原理是利用发射激光束在空间所需位置产生一个聚焦光斑, 并通过此光斑处的大气分子瑞利散射机制形成一个空间的人造散射光源。此后, 再通过接收系统对此光源的散射光进行探测, 便可测量出从地面(激光雷达处)到此空间散射光源之间的大气湍流参数。

测量装置原理如图 1 所示。该装置包括激光发射(左边)、回波接收(右边)和信号处理三个主要部分^[7-8]。其工作过程大致如下: 激光器发射的激光束经扩束望远镜(L_1, L_2)将其聚焦于空间某一点, 该点处大气分子的后向散射光由接收望远镜(L_3)收集。接收望远镜设有左右两个小的通光孔径(D_1, D_2), 接收的回波信号经视场控制(A)、光束准直(L_4)、干涉滤光(F)和光路偏折(P_2, P_3)等过程后, 在像增强 CCD(ICCD)的光敏面上形成两个光点图像。通过门控摄像和对其质心相对位置信号的处理, 即可获得被探测大气段的湍流信息。

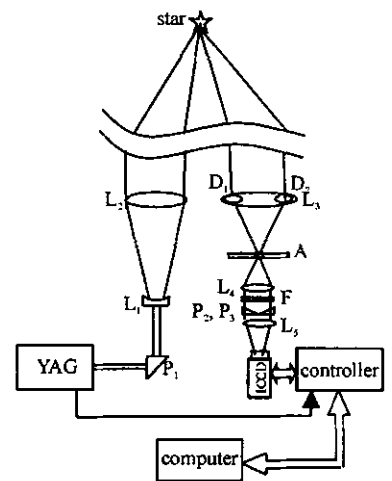


Fig. 1 Schematic of lidar for atmospheric turbulence measurement

图 1 湍流探测激光雷达结构图

* 收稿日期 2006-08-29; 修订日期 2006-11-06

基金项目: 中国科学院方向性项目资助课题(KGCX2-SW-408); 湖北省自然科学基金资助课题(2005aba312)

作者简介: 戴 阳(1969—), 男, 汉族, 安徽蒙城人, 博士研究生, 主要从事激光遥感的研究, dlaiyang69@163.com。

联系作者: 龚顺生(1942—), 男, 汉族, 湖北孝感人, 博士生导师, 主要从事原子物理和激光遥感等方面的研究, gongss@wipm.ac.cn。

本方法与传统的大气湍流光学测量方法的不同之处在于 (1) 本方法利用激光在大气中的散射形成人造光源, 而不是利用自然光源, 由于这种人造光源的方位和距离可以灵活设定, 因此, 本方法可测量各种方向和距离的大气湍流 (2) 本方法所探测的是激光的大气散射光, 而不是自然光源的直射光, 由于大气分子的散射效率很低, 使散射光的强度很弱, 因此, 本方法需要采用高灵敏度的微光探测技术。此外, 我们还采用了脉冲激光技术和门控检测技术, 以提高测量的信噪比和使测量具有距离分辨能力。

本方法发射系统的激光控制和光源形成的原理较为简单, 因此以下将着重介绍接收系统的大气湍流测量原理。我们采用性能稳定并广泛使用的差分像点移动测量方法, 即 DIM (differential image motion) 方法。DIM 方法最先由 Fried 提出^[3], 其基本原理为来自同一光源的光, 在分别沿两条不同大气路径传播时, 由于大气湍流的作用会产生波前相位起伏, 进而导致到达角的起伏, 经接收透镜会聚后, 将表现为两成像光点质心位置的相对抖动。具体做法是采用两个分隔一定距离的通光孔径, 在接收平面上测量两光点质心位置的变化, 大气相干长度为^[4]

$$r_0 = \left\{ \frac{2f^2 [0.36(\lambda/D)^{1/2} - 0.242(\lambda/d_0)^{1/3}] \lambda^{5/3}}{d_i^2 - d_i'^2} \right\}^{3/5} \quad (1)$$

式中 λ 为波长, D 为两通光孔径 D_1, D_2 的直径, f 为接收光学系统等效焦距, d_0 为两通光孔径的中心间距, d_i 为第 i 帧图像两光点质心间的距离。式中分母项表示由 N 帧图像所求得的光点质心距离的方差, 并有 $d_i^2 = (\sum d_i)/N$ 和 $d_i'^2 = (\sum d_i')^2/N^2$ 。

测得大气相干长度后, 相应的大气折射率结构常数高度积分值 $C_n^2(H) = \int_0^H C_n^2(h) dh$ 可表示为^[9]

$$C_n^2(H) = \frac{r_0^{-5/3}}{0.423k^2 \sec z} \quad (2)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, z 为导星与竖直方向的夹角, 即天顶角。

2 测量实验

实验装置如图 1 所示, 发射激光束采用来自 Nd:YAG 激光器的二倍频 532 nm 绿光, 单脉冲能量约 200 mJ, 脉冲宽度约 5 ns, 重复频率 30 Hz。激光扩束采用伽利略望远镜形式, 输出口径约 300 mm (L_2)。大的输出口径可造成大的扩束比, 有利于激光束的远场聚焦。聚焦距离的调节可通过微调负透镜 (L_1) 的轴向位置进行, 并可由门控 ICCD 成像确认。实验时, 发射激光束在空中聚焦的照片如图 2 所示。接收望远镜采用 $\phi 400$ mm, $F = 1500$ mm 透射主镜 (L_3), 并对其进行遮挡, 只留下左右两个 $\phi 50$ mm, 中心距约 320 mm 的通光孔径 (D_1, D_2)。小孔光阑 (A) 用于接收视场控制, 以降低空间背景光干扰。透镜 (L_4) 用于对接收光路的准直, 以便于干涉滤光片 (F) 进行有效滤光和由楔形玻片 (P_2, P_3) 进行光路偏折。干涉滤光片的透射宽为 $\Delta\lambda = 1$ nm, 可降低背景光干扰, 光路偏折可将来自两个通光孔径的光路适当分隔, 经 L_5 聚焦后, 在 ICCD 像敏面上获得合适的双光点图像。整个接收望远镜的等效焦距设计为 4 m, 以兼顾光点大小和湍流测量的灵敏度。探测 3 km 高度时, ICCD 获得的一帧双光点图像示于图 3。ICCD 的工作参数、与激光的同步及图像信号的采集和处理均由计算机控制进行。

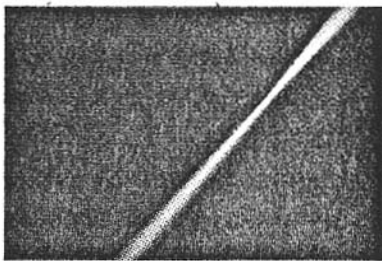


Fig. 2 Picture of focused laser beam in the sky

图 2 发射光束聚焦图

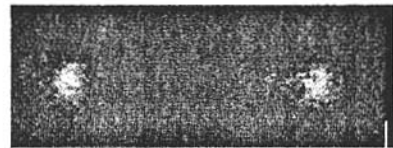


Fig. 3 Image of dual optical point taken by ICCD

图 3 两光点在 ICCD 上的成像

本方法接收部分的光路较为复杂, 为使接收光路的技术状态达到设计要求, 在整机联调之前, 需先对其进行预调。预调包括准直透镜 L_4 对视场光阑 A 的对焦和会聚透镜 L_5 对 ICCD 像敏面的对焦。由于准直透镜的出射和会聚透镜的入射均为平行光, 故预调可以在实验室中利用工作波长相近的平行光源进行。对焦一经调

定,两组光学的相对位置也将分别紧固,只留下 L_4 到 L_5 之间的平行光路长度可变,以适应整机联调的要求。此外,楔形玻片的角度也需在预调时配准。

整机联调的步骤如下(1)初调扩束望远镜使激光束大约在所需距离处聚焦(2)按所需的探测距离设定 ICCD 对发射激光脉冲延时,在大接收视场条件下,微调发射激光的方向,使 ICCD 获得双光点图像(3)减小接收视场至设定值,并调整准直透镜 L_4 和视场 A 组件,使双光点图像清晰(4)微调扩束望远镜,使双光点像最小(必要时可重复(3)和(4)两步进行调整)。经此整机联调过程后,系统即可进入测量工作状态。当改变测量距离时,通常只需要在改变 ICCD 的延时设置下,对扩束望远镜聚焦进行配合调整。若在约 1 km 以下改变测量距离还需要对 L_4 -A 组件进行配合调整,使接收望远镜获得最好的近场焦距。对于收发分离系统,改变测量方向需重复上述 4 项联调过程,如为收发一体的扫描系统,则改变测量方向不需任何调整。

ICCD 是本方法中的重要部件,它不仅由于采用了图像增强器而使 CCD 的灵敏度大幅度提高,更由于它具有快门门控功能而能获得所需距离段的散射回波图像。本实验采用 Andor 公司的 DH734 型 ICCD,其摄像门宽度、摄像门延时和增强器增益均可灵活调节,而且配合相应的软件,还可实现像素合并和窗口设置等功能,有利于提高帧频和减小数据量。实验中,我们选用 260×110 像素窗口,并采用 2×2 像素合并方式,摄像门宽通常为 $0.5 \sim 1.0 \mu\text{s}$ (相当于 $75 \sim 150 \text{ m}$ 高度段)。

3 初步测量结果及分析

利用上述装置,于 2006 年 4 月实现了对武汉上空大气湍流的激光雷达方法测量。整个实验装置位于高度约 20 m 的楼顶层,测量方向为竖直向上。测量高度 $2 \sim 5 \text{ km}$ (从距地面 20 m 算起),对每个高度的湍流层都进行了大约 10 min 的连续测量,各获得约 5000 帧双光点图像信号,数据量约为 120 MB。因此,降低帧频或压缩数据可进行更长时间的连续测量。将每个测量高度的数据按(1)式和(2)式进行处理,可获得大气湍流参数 r_0 和 $C_n^2(H)$ 随时间的变化,时间分辨率可在 s 量级以下(视帧频设置而定)。

测量高度在 3 和 4.5 km 时,所得到 r_0 数值随时间的变化分别如图 4(a)和 4(b)所示。从图可见,两种高度下的 r_0 呈现出随时间快速起伏变化的特性,可频繁地出现大约 $\pm 50\%$ 的起伏,这和许多快速曝光大气湍流测量的结果是一致的^[10]。虽然从图可以看出 3 km 高度 r_0 的平均值(约 5.8 cm)略大于 4.5 km 时的平均值(约 4.5 cm),但由于这两组结果不是取自同一时间的,因此,直接比较意义不大。原因是即使对相同的测量高度 r_0 也可能在短时间内发生明显变化。从图 4(a)可以看出,在测量开始的大约 2 min 时间内, r_0 值就产生了 2~3 cm 的变化。高度为 2, 3, 4, 5 km 的四组 r_0 测量的平均值及其起伏均方差均列于表 1 中。

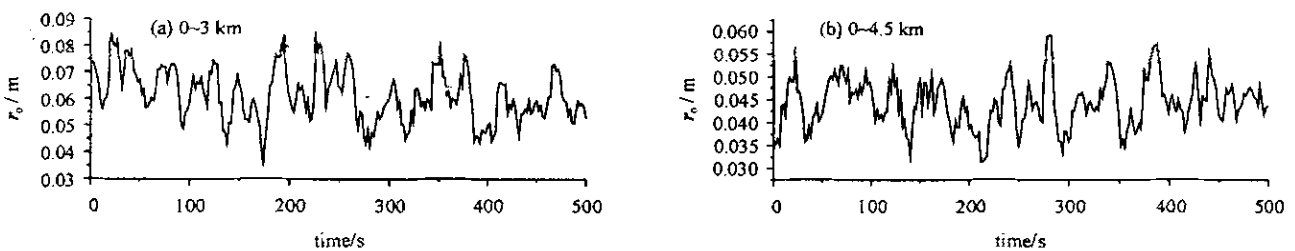


Fig. 4 Time variation of atmospheric coherence length measured in different altitude range

图 4 不同高度时大气相干长度的时间演化

表 1 不同高度的湍流参数

Table 1 Turbulence parameter in different altitude range

time	altitude/km	average of r_0 /cm	deviation of r_0 /cm	measured $C_n^2(H)/\text{m}^{-1/3}$	model $C_n^2(H)/\text{m}^{-1/3}$
04 3222~	2	6.05	1.84	1.8177×10^{-12}	1.9488×10^{-12}
04 1343~	3	5.83	1.77	1.9335×10^{-12}	2.1052×10^{-12}
01 3019~	4	5.12	1.37	2.4007×10^{-12}	2.1729×10^{-12}
02 3211~	5	4.49	0.98	2.9880×10^{-12}	2.2078×10^{-12}

为了检验本方法测量大气湍流结果的可信度,在缺乏对比测量技术的条件下,我们采用将测量结果与理论模型进行比较的办法。利用本方法测量得到某一高度 H 处的 r_0 值后,可由(2)式求得该高度范围内 $C_n^2(h)$ 的

积分值 $C_n^2(H)$ 而湍流结构的理论模型可给出 $C_n^2(h)$,在相应高度内积分也可获得 $C_n^2(H)$ 。从而可对这两者进行比较。为使模型结果更能反映实验地武汉的情况 ,我们选用地地理位置相距不远的北京天文台兴隆站的大气湍流模型。该模型基于探空资料 ,将大气折射率结构常数随高度的变化表示为^[9]

$$C_n^2 = 12.52 \times 10^{-23} h^{10} e^{-1.01h} + 9.1 \times 10^{-16} e^{-h/1.305} + 2 \times 10^{-15} e^{-h/0.52} \quad (3)$$

对表 1 所列的 4 个测量高度 ,由实验获得的 $C_n^2(H)$ 值和按兴隆模型计算得到的 $C_n^2(H)$ 值如表 1 所示。

由于湍流具有很强的随机变化特性 ,我们只期望这种比较能在数量级上符合。表 1 和图 5 均显示 ,两者在数量级上是一致的 ,即从测量和模型所得到的各种高度上 $C_n^2(h)$ 的积分值都是在 10^{-12} 量级。从表 1 和图 5 也可看出测量值和模型值在系数上出现了一定的偏差 ,但它们的变化趋势是相符的。至于 3 和 4 km 两组数据之间出现一个较大的跳变 ,我们分析是由于两组测量之间的时间间隔较长所致。因此 ,可以认为本方法对大气湍流的测量结果与模型计算结果在数量级上符合得很好。

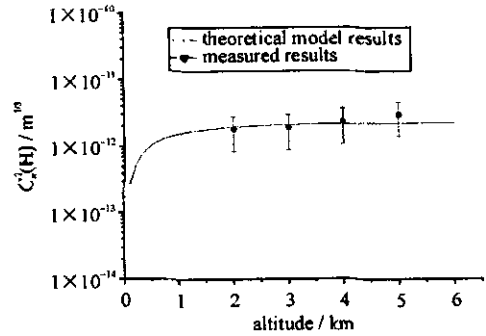


Fig.5 Comparison of measured and theoretical model results

图 5 测量结果与理论模型比较

4 结束语

本文报道了用激光雷达方法对武汉上空不同高度大气湍流的实验测量结果 ,得到了各高度层的大气相干长度 r_0 随时间的变化特性、 r_0 的平均值和起伏均方差 ,并对实验测量和模型计算的大气结构常数在相应高度段的积分值进行了比较 ,得到基本相符的结果。在国际上 ,G. G. Gimmestad^[11-12] 等人虽然也提出过类似的测量技术方案 ,但一直没有从实验上实现此技术方案。

在本测量技术的基础上 ,将探测由双孔径变成多孔径(微透镜阵列) ,即可由湍流参数探测变为波前畸变探测 ,就可实现瑞利散射激光导星技术 ,用于自适应光学系统。有关工作正在进行中 ,其结果将另文讨论。

参考文献 :

- [1] 谭徽松,岑学奋,钱铜铃. 用 DIMM 测视宁度的几个问题[J]. 云南天文台台刊,2002,1:38-46.(Tan H S, Qin X F, Qian T L. The factors influencing in the seeing measurement by DIMM. *Publication of Yunnan Observatory*, 2002, 1:38-46)
- [2] 梅海平,吴晓庆,饶瑞中,等. 不同地区大气光学湍流内外尺度测量[J]. 强激光和粒子束,2006,18(3):362-366.(Mei H P, Wu X Q, Rao R Z, et al. Measurement of inner and outer scale of atmospheric optical turbulence in different areas. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(3):362-366)
- [3] Fried D L. Differential angle of arrival: theory, evaluation and measurement feasibility[J]. *Radio Science*, 1975, 10(1):71-76.
- [4] Waldie A H, Soules D B, Drexler J J, et al. A new high speed two-dimensional CCD atmospheric turbulence monitor[C]//Proc of SPIE. 1988, 926:335-346.
- [5] Johnston R A, Wooder N J, Reavell F C, et al. Horizontal scintillation detection and ranging $C_n^2(z)$ estimation[J]. *Appl Opt*, 2003, 42(18):3451-3459.
- [6] Aavala R, Masciadri E, Vernin J, et al. Generalized SCIDAR measurements at San Pedro Martir[C]. Turbulence Profile Statistics. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2004, 116:682-692.
- [7] 程学武,宋娟,李发泉,等. 双波长高空探测激光雷达技术[J]. 中国激光,2006,33(5):601-606.(Cheng X W, Song J, Li F Q, et al. Dual-wavelength high altitude detecting lidar technology. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(5):601-606)
- [8] Gong S S, Zeng X Z, Xue X J, et al. First time observation of sodium layer over Wuhan, China by sodium fluorescence lidar[J]. *Science in China (Series A)*, 1997, 40:1228-1235.
- [9] 吴晓庆. 大气光学湍流、模式与测量技术[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版),2006,29(2):103-107.(Wu X Q. Atmospheric optical turbulence, model and measurement techniques. *Journal of Anhui Normal University(Natural Science)*, 2006, 29(2):103-107)
- [10] Birkle K, Elsasser H, Neckel T, et al. Seeing measurement in Greece, Spain, Southwest Africa and Chili[J]. *Astron Astrophys*, 1976, 46:397-401.
- [11] Belenkii M S, Stewart J M, Gimmestad G G. Experimental validation of the differential image motion lidar concept[J]. *Opt Lett*, 2000, 25(8):518-520.
- [12] Gimmestad G G. Laser sensing of atmospheric turbulence[C]//Proc of SPIE. 2003, 4884:104-109.

Method of atmospheric turbulence measurement by lidar

DAI Yang^{1,3}, LIN Zhao-xiang², ZHANG Wen-yan², CHENG Xue-wu¹,

LI Fa-quan¹, SONG Shu-yan², GONG Shun-sheng¹

(1. *Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;*

2. *College of Electric Information Engineering, South-central University for Nationalities, Wuhan 430074, China;*

3. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)*

Abstract : A method for measuring atmospheric turbulence by lidar is reported with its principle ,technology and the primary measurement results. Time variations of atmospheric coherence length measured in different altitude range , average atmospheric coherence length and the deviation of atmospheric coherence length are obtained. The integration of the measured atmospheric structure parameter is compared with that of model atmospheric structure parameter ,and the roughly coincident result is obtained. The realization of this method provides a new means for the measurement of atmospheric turbulence in different direction and different altitude ,and also a technical base of the laser guide star for adaptive optics.

Key words : Atmospheric turbulence ; Lidar(light detection and ranging) ; Atmospheric coherence length ; Differential image motion