

湍流廓线激光雷达的研制*

侯再红, 吴毅, 张守川, 王小强

(1. 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: 对采用光波波段测量大气湍流强度廓线的湍流廓线激光雷达进行了研究。利用焦点附近的大气瑞利后向散射作为测量信标测量湍流信息, 当聚焦高度不同时, 可以测得不同高度的整层信息, 从而可以得到一系列高度的整层湍流信息, 最后通过算法得到分层的大气湍流廓线。介绍了湍流廓线激光雷达系统的组成原理和系统结构, 采用像增强器的控制系统使得系统的有效测试距离达到 15 km; 通过与传统测量方法的对比, 得出了可以作为湍流强度廓线测量工具的结论。最后展望了该系统的应用前景。

关键词: 激光大气传输; 湍流廓线; 瑞利信标; 激光雷达

中图分类号: TN249

文献标识码: A

在激光大气传输中, 对湍流的测量非常重要, 因为该参数会影响目标区域光斑的大小和功率密度。水平传输路径上的湍流测量已比较成熟, 可以采用温度脉动仪, 闪烁仪等设备加以测量。但是在斜程传输或垂直传输过程中, 需要测量整层大气湍流或湍流随高度分布的廓线, 虽然也发展了很多方法, 如声雷达, 微波雷达等, 但都存在一些缺点, 如数据均为非光波波段直接测量, 测量精度不高, 测量距离有限, 需要其它参数配套测量等, 限制了湍流测量的目标范围和精度。为此, 研制采用光波波段测量的激光湍流廓线测量雷达有着重要的意义, 具有广阔的应用前景和实用价值。本文主要介绍湍流廓线雷达的原理和结构, 与传统的测量方法进行了对比, 并给出了初步的测量结果。

1 湍流廓线激光雷达的原理

湍流廓线测量雷达是基于瑞利信标的原理^[1]。即由雷达的发射系统发射一束聚焦激光束, 利用焦点处的大气后向散射, 形成一个瑞利信标, 作为雷达接收系统的信标。为了达到测量湍流廓线的目的, 使聚焦光束的焦点在需要测量的区域进行扫描, 接收系统也需要相应调整接收望远镜的焦距和像增强器曝光闸门的延时和闸门宽度, 以接收特定高度特定区域的后向散射。如图 1 所示, 像增强器曝光闸门开启时刻相对于激光从发射望远镜口发射时刻的延时时间与探测高度的关系可以描述为

$$z = t_d c / 2 \quad (1)$$

式中: z 为湍流廓线测量雷达的探测高度; t_d 为探测的延时时间; c 为激光的传播速度 ($c \approx 3 \times 10^8$ m/s)。像增强器曝光闸门开启时间宽度与探测光柱长度的关系为

$$\Delta z = c t_p / 2 \quad (2)$$

式中: Δz 是湍流廓线测量雷达探测光柱的长度; t_p 是像增强器曝光闸门开启时间宽度。同时为了满足人造信标的光斑尺寸小于接收系统子孔径的分辨角, 还应满足^[2]

$$\Delta z \geq 4.88 \lambda z^2 / D r_0 \quad (3)$$

式中: λ 是波长; r_0 是大气相干长度; 望远镜口径 D 为 350 mm, 系统中选用 λ 为 532 nm, r_0 取典型值 10 cm。由(2)式和(3)式可以得到

$$z \geq \sqrt{D r_0 c t_p / 9.76 \lambda} \quad (4)$$

可以看出, 由于 t_p 不可能为零, 所以系统存在测量盲区。

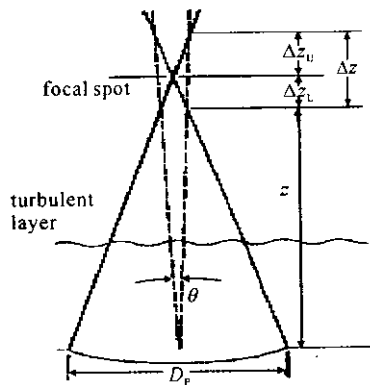


Fig. 1 Scheme of target region

图 1 待测区域示意图

* 收稿日期: 2006-03-24; 修订日期: 2006-06-05
基金项目: 国家 863 计划项目资助课题; 中国高新技术研究和发展项目资助课题
作者简介: 侯再红(1968—), 男, 博士, 主要从事大气参数测量的研究; zhhou@aiofm.ac.cn.

2 湍流廓线激光雷达的结构

从原理的分析可以看出,廓线测量雷达主要包括发射系统、接收系统、控制系统和图像采集和分析系统,下面分别讨论各个组成部分。

2.1 发射系统

发射系统的主要任务是将激光束聚焦发射在特定的区域聚焦,为了改善激光器的发散角,采用口径 350 mm 望远镜作为发射望远镜。激光器采用倍频的 YAG 脉冲激光器,波长 532 nm,单脉冲能量大于 200 mJ,根据中国科学院光电技术研究所许冰等人的研究^[3],该能量足以满足探测 12 km 高度目标的能量要求。激光脉冲重复频率 25 Hz,与像增强器的工作频率匹配。

2.2 接收系统

接收系统包括接收望远镜和像增强器及中继光路。望远镜也采用 350 mm 的望远镜,将全口径分为 6 个子孔径,子孔径口径 100 mm。像增强器采用日本滨松公司的 7069-1 像增强器,具有 4×10^6 的增益。

2.3 控制系统

为了使整个系统能协调工作,研制了专用的控制系统。控制系统通过控制步进电机从而对接收和发射望远镜的焦距进行调节,实现聚焦距离的调节;通过对像增强器的曝光延时调节和曝光闸门宽度调节,从而确保接收到的信号为待测焦点处的光信号;通过对像增强器增益的调节,确保能够接收远距离的回波光信号;为了能准确定位焦点位置和光柱长度,时间调节精度达到 5 ns。控制系统通过计算机并口与计算机通讯,从计算机获得控制指令和控制参数。

2.4 图像采集及分析系统

通过控制图像采集卡的各种控制参数,由计算机采集聚焦光束回波图像,如图 2 所示。然后利用哈特曼-夏克(Hartmann-Shack)波前传感器的波前斜率测量原理由 Zernike 波面法计算湍流强度及其廓线。

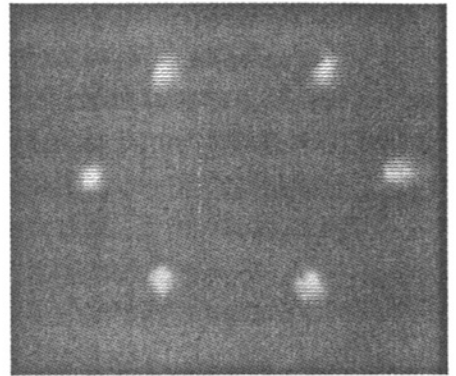


Fig. 2 Image of focused laser beam backscattering
图 2 聚焦光束回波图像

3 测量结果与分析

系统研制完成后,进行了对比实验^[4],为了能定量对比,采用水平传输,实验原理如图 3 所示,聚焦距离在 500 m 到 1 000 m 之间扫描,实验在不同条件下重复多次。扫描的终止点选择 1 000 m,主要是因为近地面水平大气中,因为湍流比较大, r_0 随距离迅速减小。湍流对焦斑的影响主要是整体漂移,而当距离达到 1 500 m 以上时,焦斑开始破碎和扩展,已不满足对信标光必须是点光源的要求。在进行垂直测量时,由于湍流强度随高度迅速减小,所以不存在上述问题。在 1 000 m 的距离上,放置一个激光器作为点源信标,采用点源信标时,系统成为一个传统意义上的相干长度仪,得到的数据与以瑞利散射为信标的激光雷达相比较,为了数据的可靠性,测量结果还与温度脉动仪测得的数据进行比较。

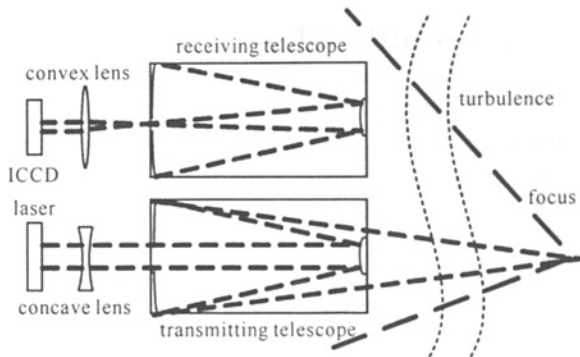


Fig. 3 Schematic of LIDAR turbulent profile system
图 3 湍流廓线激光雷达系统

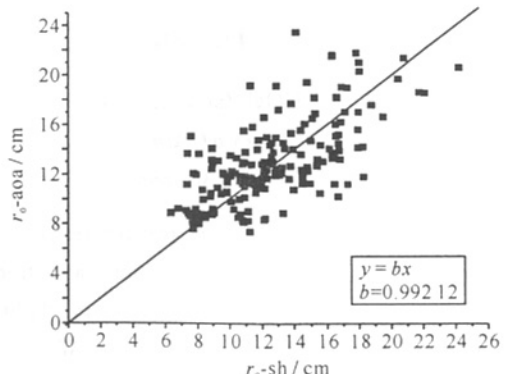


Fig. 4 Comparison of r_0 between Zernike polynomials and arrival angle fluctuation of fixed point-source at 1 000 m
图 4 在 1 000 m 聚焦距离上运用 Zernike 波面法与点源信标到达角倾斜计算的 r_0 的比较

图 4 所示是对比实验结果,图中表示的是在 1 000 m 聚焦距离上运用 Zernike 波面法计算的瑞利散射大气相干长度(r_0)与由点源信标到达角倾斜计算的 r_0 的比较,通过线性拟合 $y=bx$ 可以看出,两组数据有较好的相似度。图 5 所示的是水平传输实验结果,其中图(a)表示的是廓线雷达在水平从 440 m 到 1 000 m 测得的 10 组不同距离的 r_0 ,图(b)则是廓线雷达在水平方向从 440 m 到 1 000 m 测得的 10 组 $C_n^2(h)$ 廓线。

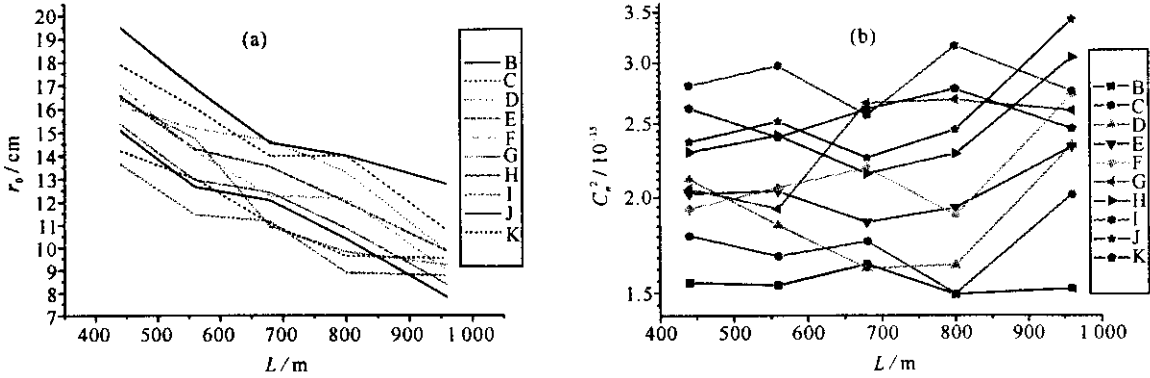


Fig. 5 Experimental data of horizontal transmission : (a) ten groups of mean r_0 profile from 440 m to 1 000 m in distance ; (b) ten groups of mean $C_n^2(h)$ profile from 440 m to 1 000 m in distance

图 5 (a)水平大气相干长度廓线,(b)水平大气湍流强度廓线

4 结 论

采用瑞利信标的湍流廓线测量雷达经与传统的测量方法对比,数据的吻合性很好,可以认为数据是可信的,可以作为湍流廓线测量的新的工具,与传统的测量手段相比,具有许多优点,如直接光学测量、数据无须反演、测量高度高、无须其他参数配合、无需合作信标等。

但是,本系统尚属初级阶段,有很大的改进余地,如采用单孔径结构,并进行一体化设计,可以研制成为高可靠性、可灵活移动的常规观测设备。

参考文献:

- [1] 张卫, 雒仲祥, 向汝建. 人造信标波前测量[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(3):375-377. (Zhang W, Luo Z X, Xiang R J. Wavefront measurement of artificial beacon. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(3):375-377)
- [2] 程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2003;159-160. (Cheng J Q. Principles of astronomical telescope design. Beijing: China Science & Technology Press, 2003;159-160)
- [3] 许冰, 姜文汉. 用于瑞利散射激光导引的激光器能量要求与分析[J]. 电子科技大学学报, 1999, 28(4):337-339. (Xu B, Jiang W H. Analysis of laser energy requirement for Rayleigh laser guide star. *Journal of University of Electronic Science And Technology of China*, 1999, 28(4):337-339)
- [4] 张守川. 利用后向散射测量大气湍流强度的探讨[D]. 合肥:中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2004. (Zhang S C. Discussion of using the backscattering echo to measure turbulent atmosphere structure constant of refractive index. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2004)

Development of turbulence profile lidar

HOU Zai-hong, WU Yi, ZHANG Shou-chuan, WANG Xiao-qiang

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

Abstract: A new system is developed for real-time monitoring of the optical turbulence altitude profile. A laser beam is transmitted and focused on certain height to form an artificial beacon. Its backscattering light propagates through the atmosphere. The lidar receives the signal coming from the scatter light of beacon and, at the same time, obtains the information of the atmosphere turbulence from the beacon to the receiver. When the laser beam is focused on different height, the lidar receives the back-scattering light coming from the corresponding beacon in that height, thus an atmosphere turbulence profile could be obtained through algorithms. The profile of the refractive index structure constant is presented using the lidar and this lidar system can be used for turbulence profiles in contrast with the traditional measurements.

Key words: Atmospheric turbulence; Turbulent profile; Rayleigh beaconing; Lidar