

## 差分像移大气湍流廓线激光雷达的研制

周颖捷<sup>1</sup>, 周安然<sup>1</sup>, 孙东松<sup>1</sup>, 强希文<sup>2</sup>, 封双连<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026;  
2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 大气折射率结构常数在自适应光学系统、天文观测以及大气湍流模型等研究领域都有着重要的意义。基于差分像移的大气湍流廓线的测量原理, 研制了一套距离分辨的大气湍流廓线激光雷达。差分像移湍流廓线激光雷达相比传统湍流测量技术对仪器误差, 比如震动和离焦不敏感, 可以对目标进行实时的主动探测, 并能够得到测路径上随距离分布的大气湍流廓线。介绍了差分像移湍流廓线激光雷达的基本原理与系统结构, 利用该湍流廓线激光雷达进行了外场探测实验, 探测距离信号发射点 200~8 000 m 的目标大气, 距离分辨率为 200~1 000 m, 共 13 个采样点。采用 50 Hz 帧率的 ICCD 相机获取信号, 每个采样点测量 20 s, 获得 1 000 张图像, 计算出对应的差分像移, 并进一步反演出对应的折射率结构常数, 得到了大气湍流的距离分布廓线, 最后对实验的结果与过程进行分析, 验证了该激光雷达系统的功能性。

**关键词:** 激光雷达; 大气湍流; 差分像移; 大气湍流折射率结构常数

中图分类号: TN958.98 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1130001

## Development of differential image motion LiDAR for profiling optical turbulence

Zhou Yinjie<sup>1</sup>, Zhou Anran<sup>1</sup>, Sun Dongsong<sup>1</sup>, Qiang Xiwen<sup>2</sup>, Feng shuanglian<sup>2</sup>

(1. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;  
2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** The tropospheric profile of the atmospheric refractive index structure characteristic is required for several applications, including performance analyses of astronomical adaptive optics systems, astronomical site surveys, and validation of atmospheric turbulence prediction models. Based on the research of differential image motion detection principle and feasibility, a turbulence profile LiDAR for measuring range profiles of atmospheric optical turbulence was developed. Compared with traditional techniques, this system was insensitive to instrumental problems, such as defocus and vibrations. The profiles of the strength of refractive turbulence and differential image motion were measured initiatively and in real time by this system. In the field experiment, the turbulence in 200–8 000 m atmosphere was measured. The range resolution of this system is 200–1 000 m, altogether 13 measured positions. Each position observed 20 seconds and got 1 000 images with a 50 Hz frame rate ICCD camera, the differential image motion of each

收稿日期: 2016-03-20; 修订日期: 2016-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(41227804, 41174130)

作者简介: 周颖捷(1990-), 男, 硕士生, 主要从事大气湍流廓线激光雷达系统方面的研究。Email: zyjzxc@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 孙东松(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事测风激光雷达方面的研究。Email: sds@ustc.edu.cn

position calculated through those images, and retrieve the result to the strength of refractive turbulence profile. Preliminary data of this field experiment shows that the LiDAR is operating properly.

**Key words:** LiDAR; atmospheric turbulence; differential image motion; refractive turbulence

## 0 引言

大气折射率结构常数  $C_n^2$  是表征大气湍流强度的重要参数, 对局地  $C_n^2$  进行长期测量, 得到其变化特征, 一方面为研究激光大气传输效应提供基础数据, 另一方面为光电系统的指标设计与工作时段选择提供依据<sup>[1]</sup>, 虽然在天文学与自适应光学领域提供了几种光学测量技术能得到湍流对于整个传输路径的积分效果, 但是不能获取指定路径上的湍流信息, 差分像移(Differential Image Motion, DIM)湍流廓线激光雷达可以得到测量范围内大气任意路径并距离分布的  $C_n^2$  廓线。

乔治理工学院(GTRI)的空军研究实验室定向能源局在 1999 年针对 DIM 激光雷达原理进行了外场实验<sup>[2]</sup>, 实验过程中发射了一束水平的 He-Ne 激光, 并扩束聚焦到 300 m 远的目标点处, 信号接收部分使用了两个间距为 30 cm 接收子瞳接收反射回来的光信号, 计算出两个像质心间距变化的方差, 在假设路径上湍流值恒定的条件下反演出了对应的湍流参数。在同样的实验条件下利用闪烁仪测量进行对比实验, 验证了 DIM 激光雷达技术的可行性。2004 年, GTRI 进一步在倾斜路径上高度为 100~1 100 m 进行了实验<sup>[3]</sup>, 并将采样频率 50~300 Hz 的测量数据进行了对比及误差分析。实验证明, 提高图像采集速率与图像采集数可提高测量精度, 但图像采集速率达到 50 Hz 时再提供采集速率对测量精度不再有影响, 而提高图像采集数会提高单个位置的累积时间, 在整个测量范围与扫描时间不变的情况下限制了距离分辨率。2007 年, GTRI 研制出了一台完整的 DIM 激光雷达样品<sup>[4]</sup>, 该样品的距离分辨率为 250~500 m, 测量高度为 250~2 000 m。该实验室针对该样品获取到数据的准确性进行了一系列连续的外场实验。将水平路径上的测量与闪烁仪进行了对比, 数据能够吻合; 垂直路径上与气球数据进行了对比, 只有部分数据吻合。其原因主要是该激光雷达样品完成其 250~

2 000 m 测量路径的扫描测量需要 12 min, 而大气环境条件在此期间已经发生变化, 大气湍流在测量过程中不变的假设条件不再成立, 所以要求 DIM 激光雷达需要对整个高度上进行更快速的扫描测量才能保证测量精度。

文中简述了 DIM 激光雷达的测量原理, 对目前研制的 DIM 激光雷达系统的结构进行了介绍, 并给出了初步的实验结果。

## 1 测量原理

差分像移法(DIMM)目前作为大气湍流的测量技术被得到广泛的认可, 传统的差分像移监测仪是通过分开的两个子瞳对恒星成像, 子瞳之间由于大气湍流作用导致的到达角起伏将产生像的抖动, 这种抖动产生的质心间距变化的方差对应差分像移  $\sigma_{DIM}^2$ , 进一步得到整个大气路径中的湍流积分效应  $\overline{C_n^2}$ 。DIM 激光雷达是基于 DIMM 改进的一种技术, DIM 激光雷达利用激光导星(LGS)取代 DIMM 中使用的自然光源, 即将扩束后的激光光束聚焦到特定的测量位置, DIM 激光雷达系统由一个可变扩束系统将激光束聚焦在指定的测量位置, 产生的大气的后向散射光经过两个子瞳口径由卡塞格林望远镜接收, 并在增强型 CCD(ICCD)照相机上成像。每个测量位置获取一定数量的图像数据, 计算两个光斑质心间距变化的方差  $\sigma_{DIM}^2$ 。通过调节扩束系统的主次镜间距把激光束聚焦到不同的高度  $h_1, \dots, h_n$ , 并根据测量距离设置采集的延时与累积厚度得到  $\sigma_{DIM}^2$  高度分布。

Eaton 等人于 1998 年提出了早期的差分像移分析方法<sup>[5]</sup>, 并应用于恒星的观测, 有如下的等式:

$$\sigma_{DIM}^2 = f\left(\frac{d}{D}\right) D^{-1/3} \overline{C_n^2} \quad (1)$$

$$f(d/D) = 33.2 \times [0.349 - 0.242(d/D)^{-1/3}] \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{DIM}^2$  为差分像移;  $d$  为子孔间距;  $D$  为子孔直径;  $\overline{C_n^2}$  为上文提到的整个路径的湍流积分。随后

Sarazin 与 Roddier 提出了独立分析纵向与横向两坐标轴的运动的方法<sup>[6]</sup>,得到了  $f$  表示为:

$$f(d/D)=33.2 \times [0.358 - 0.242(d/D)^{-1/3}] \quad (3)$$

湍流的路径积分定义为:

$$\overline{C_n^2} = \int_0^H C_n^2(H)(1-h/H)^{5/3} dh \quad (4)$$

式中:  $H$  为激光导星距离接收系统的距离。由公式(2)~(4)可将  $\sigma_{DIM}^2$  的高度分布廓线反演得到对应的  $\overline{C_n^2}$  的高度分布廓线<sup>[7]</sup>。

## 2 系统结构

DIM 激光雷达系统由发射系统、接收系统、数据采集处理与电控系统、支撑平台构成。系统具体参数见表 1 和表 2,系统光路结构如图 1 所示。

表 1 发射系统参数

Tab.1 Parameters of transmitter system

Parameter	Value
Laser type	ND:YAG
Wavelength/nm	532
Pulse energy/mJ	600
Pulse repetition frequency/Hz	50
Pulse width/ns	5.8
Raw beam divergence/mrad	0.5
Spot diameter/mm	9
Primary mirror diameter/mm	250
Secondary mirror diameter/mm	9
Expanding ratio	26

表 2 接收系统参数

Tab.2 Parameters of receiver system

Parameter	Value
Sub-aperture diameter/mm	100
Sub-aperture counts	2
Sub-aperture separation/mm	470
Primary mirror diameter/mm	100
Secondary mirror diameter/mm	20
Focal length/mm	4 000
Pixel array/pixel	1 024×1 024
Quantum efficiency	48%(532 nm)
Elemental area/mm	13.1×13.1
Pixel size/ $\mu$ m	12.8×12.8
ICCD read noise	70e-rms

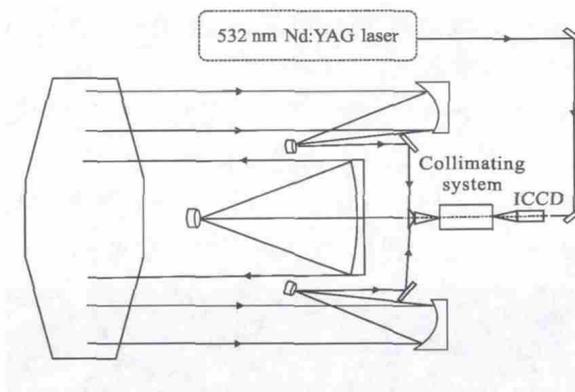


图 1 DIM 激光雷达光路系统图

Fig.1 Optical system of DIM LiDAR

数据采集处理与电控系统由工业控制计算机、电机控制器、电动平移台、电动旋转台与安装于工控机系统测量控制程序构成。测量控制程序可发送指令给电机控制器、控制电动平移台与电动旋转台。控制电动平移可对光束发射与接收进行调焦,控制电动旋转台可调节光束的发射方向。测量时,测量控制程序针对不同的测量位置调焦完成后,命令 ICCD 照相机开始采集数据,并从 ICCD 照相机中读取采集得到的图像数据进行分析与湍流强度反演。

支撑平台采用定制的标准光学平台,台面尺寸为 1.5 m×1.8 m,左侧开一凹槽,尺寸 200 mm×550 mm,为收放扫描平面镜之用。平台总高度约 720 mm。平台底部具有四个可调节水平的支撑腿和可实现小范围移动四个转向轮,系统具体实物图如图 2 所示。



图 2 差分像移激光雷达系统实物图

Fig.2 Physical map of DIM LiDAR

## 3 实验结果与分析

DIM 激光雷达系统的研制初步完成后,进行了一些实验对系统进行功能性的验证。在 200~8 000 m 的大气中以距离分辨率 200~1 000 m 选取了 13 个位置进行探测,每个位置获取了清晰的大气回波成像。

当测量位置距离为 200 m 时, 光斑的平均亮度可达到背景噪声的 40 倍。当测量距离为 8 000 m 时, 光斑平均亮度为背景噪声的 1.4 倍, 测量控制程序依然能够从图像识别并提取出光斑信息, 图 3 为激光汇聚到距离激光雷达 8 000 m 的大气后向散射信号在 ICCD 照相机上的图像, 具体的测量参数见表 3。



图 3 8 000 m 激光导星的成像

Fig.3 Image of 8 000 m laser guide star

表 3 系统测量参数

Tab.3 Measurement parameters of system

Parameter	Value
Measuring range/m	200~8 000
Pitch angle/(°)	60~90
Range resolution/m	200~1 000
Acquisition frequency/Hz	50
Image counts	1 000(each measurement position)
Acquisition time/s	20(each measurement position)
Time of measurement/min	6(total)

根据 G.G.Gimmestad 等人实验得到的结论<sup>[3]</sup>, 当采集图像的速率大于 50 fps 时, 提高采集图像速率不再提高测量的精度, 所以实验时采用 50 fps 的采集速率。激光器提供一个 50 Hz 的触发信号给 ICCD 照相机, ICCD 根据不同的测量具体设置开门延时, 获取 1 000 份图像数据。测量控制程序获取图像后提取出图像的光斑信息, 计算出两个光斑的质心间距, 最后求出方差, 得到差分像移, 反演出对应的  $C_n^2$  廓线。图 4 为实验测得的距离激光雷达 200~8 000 m 大气的差分像移。误差棒由标准方程得出<sup>[8]</sup>:

$$\frac{\delta\sigma_{DIM}^2}{\sigma_{DIM}^2} = 2\sqrt{\frac{1}{N-1}} \quad (5)$$

式中:  $N$  为每个位置获取的图像帧数,  $N$  的值越大误差会越小, 但是提高  $N$  将提高累积时间, 导致对整个测量范围的扫描时间增加, 大气环境发生变化的可

能性增加, 影响测量精度<sup>[4]</sup>。综合考虑采用的  $N=1 000$ , 每个点累积的时间 20 s, 但由于系统光学调焦与处理数据需要一定的时间, 产生一组廓线需要 6 min, 即 6 min 可以对 200~8 000 m 的大气环境进行一次扫描测量, 并生成湍流强度廓线, 实现了对整个测量范围的快速扫描测量。

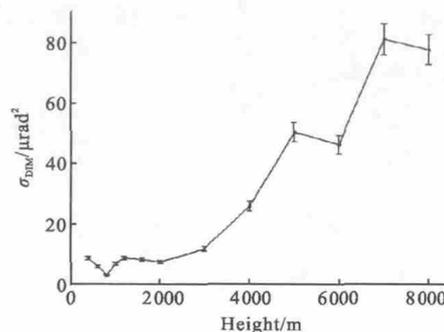


图 4 2015 年 5 月南京实验测得大气差分像移数据

Fig.4 Averaged DIM for image data collected in Nanjing on May, 2015

可以观察到由于湍流的积分效应随着高度的提升, 差分像移越大。图 5 为由差分像移反演所得到的  $C_n^2$  廓线。随着高度的增加, 湍流的强度明显下降。

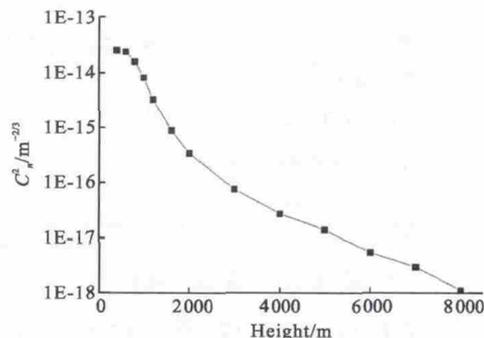


图 5 2015 年 5 月南京实验测得的  $C_n^2$  廓线

Fig.5  $C_n^2$  profile for Nanjing, May 2015

## 4 结 论

开发研制了一套基于差分像移原理的湍流廓线激光雷达, 用于测量大气折射率结构常数与差分像移高度分布廓线。进行了功能性验证的实验, 证明了该激光雷达功能已经基本完善。在大气回波信号测量的实验中获取到了 200~8 000 m 中不同位置的大气后向散射的信号。实验证明, 在距离发射点 200~8 000 m

处的任意测量点均可以获取到回波信号,并且测量控制程序能够从光斑中提取出反演数据的必要信息,进一步计算出差分像移,反演得出对应的湍流强度廓线。但由于实验场地的限制,目前没有与其他湍流测量手段所得到的数据进行对比,同时也不能对各个高度激光汇聚的位置进行标定,激光汇聚的位置只是经过 ICCD 设置对应的采集延时计算得出,存在一定的误差,可能是导致测量的差分像移的数据并不能看出湍流效应随着距离增加变小的趋势的原因,这些问题还需在进一步的外场实验中解决。

#### 参考文献:

- [1] Feng Shuanglian, Zhang Zhigang, Qiang Xiwen, et al. Statistical analysis of atmospheric refractive index structure constant near ground in Gobi region [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(1): 39-42. (in Chinese)  
封双连, 张志刚, 强希文, 等. 戈壁地区近地面大气折射率结构常数的统计分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(1): 39-42.
- [2] Belen'kii M S, Roberts D W, Stewart J M, et al. Experimental validation of the differential image motion lidar concept[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(8): 518-520.
- [3] Gimmestad G G, Dawsey M W, Roberts D W, et al. Field validation of optical turbulence lidar technique [C]//Defense and Security, International Society for Optics and Photonics, 2005, 5793: 10-16.
- [4] Gimmestad G G, Roberts D W, Stewart J M, et al. Testing of LIDAR system for turbulence profiles [C]//SPIE Defense and Security Symposium, International Society for Optics and Photonics, 2008, 6951: 695109.
- [5] Eaton F D, Peterson W A, Hines J R, et al. Comparison of two techniques for determining atmospheric seeing [C]//1988 Orlando Technical Symposium, International Society for Optics and Photonics, 1988, 296: 319-334.
- [6] Sarazin M, Roddier F. The ESO differential image motion monitor [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1990, 227: 294-300.
- [7] Gatland I, Stewart J M, Gimmestad G G. Inversion techniques for the differential image motion lidar [C]//SPIE Defense, Security, and Sensing, International Society for Optics and Photonics, 2009, 7324: 73240C.
- [8] Frieden B R. Probability, Statistical Optics, and Data Testing [M]. 3rd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2001.