文章编号:1001-5078(2016)08-0929-05

· 激光应用技术 ·

基于瑞利激光导星的大气湍流廓线测量仪设计

江 伦,张 雷,董科研,安 岩,王 超,佟首峰 (长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室,吉林长春130022)

摘 要:对基于瑞利激光导星的大气湍流廓线测量系统进行了研究,系统利用脉冲激光在测量 区域大气层内不同高度形成信标星,以此测量地面至信标星之间的大气湍流信息。本文在分 析瑞利激光导星湍流廓线测试的原理和系统组成基础上,对系统关键参数进行了优化选取,并 设计了激光发射系统和差分像移接收系统,最后对系统性能进行评估。结果表明:系统可对地 面高度 0.2~10 km 范围内的大气进行湍流廓线测量,该技术在地基天文观测、星地激光通信、 地基激光武器领域具有重要的应用价值。

关键词:湍流廓线;瑞利激光导星;差分像移

中图分类号:TH74 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2016.08.004

Design of atmospheric turbulence profile instrument based on Rayleigh laser guide star

JIANG Lun, ZHANG Lei, DONG Ke-yan, AN Yan, WANG Chao, TONG Shou-feng

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aero and Ground Laser Communication Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Atmospheric turbulence profile test system based on Rayleigh laser guide star is studied, the pulsed laser used to form beacon star at different heights in atmospheric, then the atmospheric information between ground and guide star were obtained. Based on the analysis of principles and system components, the system critical parameters were optimized. And the laser transmits system and differential image motion system was designed. Finally, the system performance, the results showed that $0.2 \sim 10$ km atmospheric turbulence profile can be measured by this instruments. This can be used in the area of astronomical observations, satellite-ground laser communications, and ground – based laser weapons.

Key words: atmospheric turbulence profile; Rayleigh laser guide star; differential image motion

1 引 言

光波在大气中传输时受大气湍流的影响,其强 度、相位及传播方向等参数会随空气折射率的变化 随机变化,产生如光斑抖动、光强起伏、光束扩展等 现象^[1]。这严重限制了地基天文望远镜、星地激光 通信、高能激光武器等光电设备的性能发挥。因此, 开展对大气湍流的测量对光在大气中的传输特性研 究具有十分重要的意义,据此可对地面光电设备进 行波前校正及性能预估。目前,水平传输路径上采 用温度脉动仪、闪烁仪等测量方法,技术较为成熟。 斜程传输路径上可采用探空式测量、风廓线微波雷 达及声雷达测量,但探空式测量的探测区域受风向 影响通常无法保证,风廓线微波雷达及声雷达为非 光波波段测量,数据反演到光波波段涉及水气廓线、

作者简介:江 伦(1984 –),男,博士,讲师,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail:jlciomp@163.com 收稿日期:2015-11-02

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 91338116)资助。

激光与红外

温度廓线的测量,测量较复杂^[2]。国外 Belen' kii 提 出基于瑞利导星的差分像移 DIM 激光雷达湍流廓 线的思想[3-4],该方法将一束激光聚焦在预定高度, 利用大气分子、原子、气溶胶等产生后向散射,利用 差分像移激光雷达接收散射信号,进而反演出传播 路径上的湍流强度,调整导星高度,可实现对大气湍 流的廓线测量,这种结构可抑制温度变化、振动等对 测量系统的影响。乔治理工学院(GTRI)的 Gary Gimmestad 等人对此进行了大量的实现验证,并已 经开始研制成熟测量系统^[5-8]。国内武汉数学与物 理研究所于 2006 年采用此种方法测量了武汉地区 上空25 km 的积分湍流值^[9]。中科院安徽光机所也 研制了差分湍流测试激光雷达样机,并进行了初步 的实验验证^[10]。西北核技术物理研究所对差分湍 流廓线雷达测量误差进行了分析^[11]。但未见湍流 廓线测试仪的关键参数的优化选取、光学系统设计 的详细报道。

本文从测量原理和系统组成方面简单介绍了 基于瑞利导星的大气湍流廓线测试仪,着重分析 了系统的关键参数的选取,并对系统光学部分进 行了详细的设计。根据分析结果,对系统性能进 行了预估。

2 系统总体设计

2.1 湍流廓线测量原理

在基于瑞利激光导星的大气湍流强度廓线 测量系统中,首先使用发射望远镜将由激光器出 来的光束扩束并聚焦在空中设定高度,利用焦点 处光斑的后向散射,形成瑞利激光导星,作为差 分像移激光雷达的信标。差分像移激光雷达对 信标星在 ICCD 成像,多次采样后计算出两个光 斑像质心间距变化的方差 σ²_{DIM}。调整发射系统 主次镜间距改变瑞利激光导星的高度,得到分层 分布差分像移方差 σ²_{DIM},然后反演出大气湍流 廓线。



based on Rayleigh laser guide star

由差分像移方差解析大气湍流:

$$\sigma_{\rm DIM}^2 = f(d/D) D^{-1/3} C_n^2 \tag{1}$$

 $f(d/D) = 33.2 \times [0.349 - 0.242(d/D)^{-1/3}]$ (2) 式中, σ_{DIM}^2 是差分像移方差; D 是子孔径直径; d 是 子孔径间距; C_a^2 是整个路径的湍流积分效果, 为:

$$C_n^2 = \int_0^R C_n^2(h) \ (1 - \frac{h}{R}) 5/3dh \tag{3}$$

2.2 系统组成与关键参数选取

激光瑞利导星湍流廓线测试仪组成如图 2 所 示,系统由高功率脉冲激光器、激光发射系统、差分 像移接收系统、同步控制系统、数据采集及处理系统 组成。通过调整激光发射系统调焦镜位置实现聚焦 光斑在测量区域高度内扫描,差分像移接收系统对 其进行成像,同步控制系统控制脉冲激光器、激光发 射系统调焦镜位置、差分像移接收系统焦面位置、探 测器曝光闸门的延时和时长等,以接收特定高度区 域的后向散射。





系统所选用激光器为脉冲激光器,主要考虑波 长、重复频率、脉冲能量等参数。系统所选波长越 短,其大气后向散射系数越大,在同一高度探测所需 脉冲能量更小,但需同时考虑激光器的研制难度,确 定系统工作波长为532 nm;激光器重复频率越高, 单位时间内测试样本越多,测量精度更高、但单个脉 冲能量降低,光斑质量和能量稳定性也会变差,参照 文献^[12-13],重复频率为 50 Hz;脉冲能量与最高探测高度有关,根据文献^[14]的研究结果和激光器水平,确定单脉冲能量为 600 mJ,可满足探测高度 10 km 要求。

激光发射系统口径决定激光导星的直径,口径 越大,同一大气层高度上所形成导星直径越小,参照 文献^[9],确定激光发射系统口径为300 mm。差分像 接收系统子口径决定系统接收导星后向散射的光子 数,取为100 mm,子口径间距取400 mm。

ICCD 相机的主要参数主要有:延时长度、积分时间等。其中延时长度指 ICCD 曝光闸门开启时刻 相对于激光脉冲从激光发射系统发射时刻的延时时间,其与探测高度有关:

$$h = t_d c/2 \tag{4}$$

式中, h 为探测高度; t_d 为延时长度, c 为激光在大 气中的传播速度。相机曝光门限宽度与探测光斑深 度的关系:

$$\Delta h = t_P c/2 \tag{5}$$

其中, Δh 为测试仪探测光柱长度; t_p 为 ICCD 曝光 门限宽度。

最终确定系统的主要参数如表1所示。

表1 湍流廓线测试仪主要参数表

Tab. 1 Parameters of turbulence profile instrument

subsystem	parameter	value
Laser	Laser type	Nd : YAG
	Wavelength	532 nm
	Pulse energy	600 mJ
	Pulse repetition frequency	50 Hz
Laser transmissive system	Aperture	300 mm
DIM	subaperture diameter	100 mm
	Distance of subaperture	400 mm
	Focal length	2000 mm

3 光学系统设计

3.1 导星发射光学系统

整个激光发射系统由扩束镜组和反射镜组组 成,Nd:YAG出射的激光经过扩束后由反射镜组发 射。扩束镜由两片透镜组成,其中第2片作为系统 的调焦镜,通过按预定曲线移动这片调焦透镜可改 变整个系统焦距,使得系统出射的激光会聚在 200~10000 m 处。反射镜组由两片抛物面反射镜 组成,主镜口径 300 mm,次镜口径 30 mm。设计图 如图3所示。





高度之间的关系,如图4所示。



图 4 调焦镜移动距离与瑞利星高度之间的关系 Fig. 4 Relationship between star height and moving distance of focusing lens

3.2 导星接收光学系统设计

系统主要由望远镜系统和光学成像系统组成, 望远镜系统有两种结构形式,一是在大口径望远镜 上取两个子孔径的方法;二是利用两个子孔径光学 系统实现差分像移成像;反射式光学系统具有透过 率高、无色差、体积小等优点,本系统拟采用两个离 轴反射式望远镜组成差分像移接收系统。本系统子 孔径为 100 mm, 焦距为 2 m,采用探测器大小 1024×1024,像素大小为 12.8 μm,系统视场为 0.38°,最终设计结果如图 5 所示。

整个光学系统主要由主次镜组成的望远镜、双 光楔组、532 nm 窄带滤光片、共用聚焦镜头组成。 其中望远系统倍率为 10 ×,共用聚焦镜头焦距为 200 nm。532 nm 滤光片的作用是减小到达探测器 的杂光,提高系统的信噪比;双光楔的作用是实时调 整探测器上光斑的位置,使两像点之间的距离在合 理的范围之内。



图 5 差分像移接收系统设计图 Fig. 5 Layout of differential image motion system

图 6 是系统的 MTF 曲线图,从图中可以看出, 系统各视场的传递函数均接近衍射极限,表明系统 设计成像质量良好。



图 6 系统的 MTF 图 Fig. 6 The MTF curves of the system

4 系统性能分析

湍流廓线测量仪一次测量要求在 10 min 之内 完成,因为一般假设大气在 10 min 之内是固定不 动,即系统整个测量过程样本数不超过 30000。同 时为提高测量精度,要求同一高度测量点获得的测 量样本数尽量多。综合考虑,在高度 200 ~ 10000 m 范围内采样点为 12 个,每个采样点测量时间 40 s, 样本为 2000。采样点间距随高度增加而增大,尽可 能真实体现大气湍流的分布情况。

根据以上设计,可对系统性能进行分析,差分像 接收系统可接收的信号光子数为:

$$N(h) = Ek_h(\frac{A}{h^2})\Delta h(h)\beta(h)/hc$$
(6)

式中, N(h) 是差分像移接收系统在导星高度在 h 时接收的光子数; E 为激光脉冲能量; k_h 是接收系统的透过率; A 是接收系统子孔径面积; h 为导星与接收系统的距离; $\Delta h(h)$ 为导星在高度 h 处的光柱长度; $\beta(h)$ 为大气后向散射特性系数; h 为普朗克常量; c 为激光传播速度。

式(6)中, E = 0.6 J, $k_h = 0.8$,子口径面积A = 0.0078 m²,探测高度 h = 10 km,探测光柱长 $\Delta h(h) = 1000$ mm,后向散射系数 $\beta(h) = 1 \times 10^{-7}$ m⁻¹·Sr⁻¹。 得接收的光子数为 1.0083 × 10⁴个。假设光斑所占 像素为9个,单个像素接收光子数为 1120,系统所 选 ICCD 相应光强为 100 个,故此设备可满足最大 测量高度 10 km 的使用要求。

5 结 论

本文介绍了基于瑞利激光导星的大气湍流廓线 测量仪的原理与实现方法,对系统的关键参数进行 了分析与优化选取,并对激光发射系统和差分像仪 进行了光学设计。根据系统性能评估结果,该系统 可实现地面 0.2~10 km 高度范围内的湍流廓线测 量。该测量仪可用于天文观测、星地激光通信、高能 激光武器等应用领域。

参考文献:

- [1] Tatarski. Wave Propagation in a Turbulent Medium[M]. Trans. Wen J S. Beijing: Science Press, 1978. (in Chinese)
 塔塔尔斯基. 湍流大气中波的传播理论[M]. 温景篙, 等译,北京:科学出版社,1978.
- [2] ZHANG Shouchuan, WU Yi, HOU Zaihong. Lidarmeasurement of atmospheric turbulence vertical profiles [J]. High Power Laser and Partical Beams, 2009, 21 (12): 1795 1798. (in Chinese)
 张守川,吴毅,侯再红.激光雷达测量大气湍流廓线 [J].强激光与粒子束,2009,21(12):1795 1798.
- [3] M S Belen' kii. Multiple-aperture averaging technique for measuring full aperture tilt with a laser guide star [J]. Proc. SPIE, 1997, 3126:101.
- [4] M S Belen' kii, D W Roberts, J M Stewart, G G Gimmestad. Experimental validation of the differential image motion lidar concept[J]. Optics Letters, 2000, 25(8):518 – 520.
- [5] G G Gimmestad, M W Dawsey, D W Roberts, et al. Field validation of optical turbulence lidar technique [J]. Proc. of SPIE, 2005, 5793:10 - 16.
- [6] G G Gimmestad, D W Roberts, J M Stewart, et al. Testing of LIDAR system for turbulence profiles [J]. Proc. of SPIE, 2008, 6951:695109.

- [7] J M Gatland, G G Gimestad. Inversion techniques for the differential image motion lidar [J]. Proc. of SPIE, 2009, 7324;73240C1.
- [8] G G Gimmestad, D Roberts, J Stewart, et al. Development of a lidar technique for profiling optical turbulence [J].
 Opt. Eng., 2012,51(10):101713.
- [9] DAI Yang, LIN Zhaoxiang, ZHANG Wenyan, et al. Mothod of atmospherica turbulence measurement by Lidar[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18 (11): 1769 1773. (in Chinese)
 戴阳,林兆祥,张文艳,等. 激光雷达大气湍流测量方法研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18 (11): 1769 1773.
- [10] HOU Zaihong, WU Yi, ZHANG Shouchuan, et al, Development of turbulence profile lidar [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(10):1602 - 1604. (in Chinese)

侯再红,吴毅,张守川,等. 湍流廓线激光雷达的研制 [J]. 强激光与粒子束,2006,18(10):1602-1604.

[11] GUO Jie, SUN Dongsong, QIANG Xiwen, et al. Error analysis of differential image motion lida [J]. Acta Optical Sinica, 2014, 34(8):0801004. (in Chinese)

郭洁,孙东松,强希文,等. 差分像移湍流廓线激光 雷达测量误差分析[J]. 光学学报, 2014, 34 (8):0801004.

- [12] NI Zhibo, HUANG Honghua, MEI Haiping, et al. Extracting turbulence information form echo signal of micropulse lidar[C]. Proc. of SPIE, 2009, 7382:73822L.
- [13] CUI Chaolong, HUANG Honghua, MEI Haiping, et al. Study on acquiring turbulence information using Mie scattering lidar[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2011, 6(2):89-94. (in Chinese) 崔朝龙,黄宏华,梅海平,等. 利用米散射激光雷达获取湍流信息的方法研究[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(2):89-94.
- [14] XU Bing, JIANG Wenhan. Analysis of laser energy requirement for rayleigh laser guide star[J]. Journal of EST of China, 1999, 28(4):337-339. (in Chinese)
 许冰,姜文汉. 用于瑞利激光导引星的激光器能量
 要求与分析[J]. 电子科技大学学报, 1999, 28(4): 337-339.