

# 紫外域激光雷达探测西安城区 上空大气气溶胶时空剖面\*

刘君, 华灯鑫, 李言

(西安理工大学 精密仪器工程系, 西安 710048)

**摘 要:**开发了一套紫外域波长的米散射激光雷达系统,探测西安城区上空大气气溶胶污染物质的光学特性及时空变化. 系统选用对人眼较为安全的 355 nm 波长激光作光源,采用高光谱分辨率光栅,并借助光阑,将接收到的主要大气回波信号谱线(米散射和瑞利散射光谱与白天太阳背景光)从空间分离,剔除大部分太阳背景噪音,提高系统的白天探测能力. 通过对西安城区上空的气溶胶时空变化特性进行 24 h 连续观测,采用 Klett 方法反演得到气溶胶消光系数,首次测得西安城区不同时刻消光系数的高度分布剖面图以及 24 h 内气溶胶相对质量密度的时空变化特性.

**关键词:**激光雷达;气溶胶;消光系数;对流层

**中图分类号:** TN958.98

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2007)08-1534-4

## 0 引言

大气中的尘埃、烟雾、云团等气溶胶粒子对大气的辐射平衡、化学过程、气候变化乃至人们的日常生活都有着重要的影响. 因此,对大气气溶胶粒子的光学特性的探测研究一直是大气科学、气象探测和环境保护的一项重要任务<sup>[1]</sup>.

近年来,中国经济的飞速发展已受到全世界的关注. 然而,这种快速的经济增长也伴随着社会体系的变革,高度的工业化和城市化造成许多气溶胶粒子和温室气体被排放到大气中,带来了一系列的环境问题,影响着人们的日常生活和身体健康. 西安位于中国的西部地区,其特殊的地理位置和高度的经济发展状况,造成大气中的气溶胶粒子含量较高,空气污染较为严重. 对西安城区上空进行气溶胶时空分布探测研究,一直是气象、环保部门想要开展的工作.

激光雷达作为一种主动遥感探测工具,已广泛用于大气传输、全球气候预测、气溶胶辐射效应及大气环境等研究领域<sup>[2-7]</sup>. 随着激光技术、信号探测技术和数据采集及控制技术的发展,使激光雷达在大气气溶胶的探测高度、空间分辨率、时间上的连续监测和测量准确度等方面具有独到的优势,是其它探测手段无法比拟的. 米散射激光雷达由于具有结构简单,所需激光能量相对较低,易于操作等特点,已成为探测大气气溶胶光学特性的主要工具. 到目前

为止,气溶胶探测主要采用的激光探测波长为 532 nm<sup>[8-10]</sup>.

西安理工大学建立了一套激光雷达系统,可用于对流层气溶胶光学特性的探测研究,并已对西安城区的大气气溶胶进行了观测. 系统选用 355 nm 波长激光作光源. 相比同等能量密度的 532 nm 波长激光,355 nm 激光对人眼的安全性可提高约 3 000 倍;355 nm 波长上的太阳背景光较弱,系统易于实现白天高准确度探测;355 nm 波长上,分子散射信号较强,有利于在较高探测高度上准确获得大气分子散射模型,从而提高气溶胶消光系数反演算法的准确度.

本文介绍了已建立的米散射激光雷达系统构成及系统参量,叙述了气溶胶光学特性参量的反演算法,并首次给出了西安城区大气气溶胶消光系数高度分布的探测结果,以及 24 h 连续观测的时空变化.

## 1 米散射激光雷达系统

实验所用米散射激光雷达系统示于图 1. 系统采用 Nd:YAG 脉冲激光器作光源,为了提高白天测量的能力并考虑到人眼安全,选用其三次谐波波长 355 nm 为探测波长. 激光束经准直扩束后垂直射入大气,大气的后向散射光由视场为 0.1 mrad、直径为 250 mm 的望远镜接收,并耦合进入多模光纤. 光纤输出信号经准直后入射到一块高光谱分辨率光栅(光栅刻划密度为 2 400 gr/mm,谱分辨率为 6 pm),光栅衍射后的大气回波信号,经过聚焦透镜聚焦,在焦平面上形成光谱分布,利用小孔光阑,分离出主要的大气回波信号(米散射和瑞利散射),剔除大部分太阳背景光及非弹性散射信号,最后米散

\*国家自然科学基金(40675015)和陕西省自然科学基金(2006D07)资助

Tel: 029-82312311 Email: junliu87@xaut.edu.cn

收稿日期: 2006-10-16

射及瑞利散射光由光电倍增管(PMT)检测. 光栅、透镜及光阑组成了一个带宽为 1 nm 的分光系统. 激光雷达系统参量示于表 1.

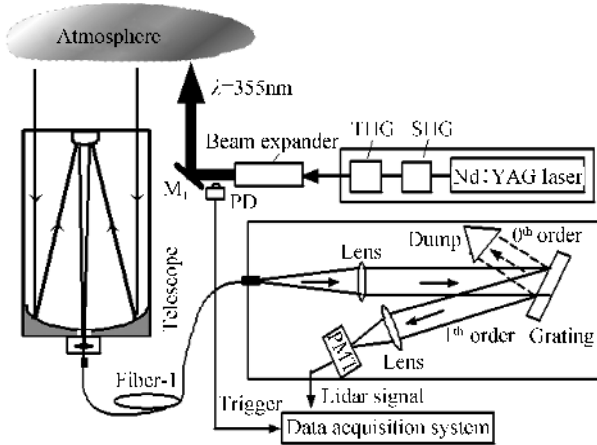


图 1 米散射激光雷达系统框图

Fig. 1 Diagram of the Mie scattering lidar system

表 1 米散射激光雷达系统参量

Nd : YAG Laser	
Wavelength	355 nm
Pulse energy	30 mJ
Pulse repetition rate	20 Hz
Telescope:	
Efficiency aperture	250 mm
Field of view	0.1 mrad
Optics:	
Fiber core diameter	100 $\mu\text{m}$
Grating density	2 400 gr/mm
Detector:	
Photomultiplier tubes	Hamamatsu R3896
Quantum efficiency	23% at 355 nm

## 2 气溶胶消光系数的反演方法

激光雷达接收到的高度  $z$  处的大气后向散射回波信号的能量  $P(z)$  由激光雷达方程决定

$$P(z) = P_0 C z^{-2} \beta(z) \exp \left[ -2 \int_0^z \sigma(z') dz' \right] \quad (1)$$

式中  $P_0$  为激光发射的功率,  $C$  为激光雷达系统常量,  $z$  为探测距离,  $\beta(z)$  和  $\sigma(z)$  分别为高度  $z$  处大气总的后向散射系数和消光系数.

在利用激光雷达信号反演大气消光系数的算法中, 比较常用的有 Fernald 法<sup>[11]</sup> 和 Klett 法<sup>[12]</sup>, 对一般的大气环境, 常采用 Klett 法反演大气消光系数. Klett 法中假设气溶胶后向散射系数  $\beta$  和消光系数  $\sigma$  之间存在如下的指数关系

$$\beta = B \sigma^k \quad (2)$$

式中,  $B$  和  $k$  与激光雷达波长、气溶胶粒子的性质和尺度谱分布有关,  $k$  的取值在 0.67~1.3 之间, 在此取  $k=1$ , 并令  $S=1/B$ , 则有  $\sigma/\beta=S$ ,  $S$  称为激光雷

达比, 这里假设  $S=40 \text{ sr}^{[13]}$ .

设激光雷达回波信号的距离平方修正函数为

$$X(z) = P(z) z^2 \quad (3)$$

如果事先已知某一边界值高度  $z_c$  处大气总的消光系数  $\sigma(z_c)$  或后向散射系数  $\beta(z_c)$ , 则  $z_c$  处以下各高度上的气溶胶粒子消光系数  $\sigma_a(z)$  或后向散射系数  $\beta_a(z)$  分别为

$$\sigma_a(z) = \frac{X(z)}{\frac{X(z_c)}{\sigma(z_c)} + 2 \int_z^{z_c} X(z') dz'} - \sigma_m(z) \quad (4)$$

$$\beta_a(z) = \frac{X(z)}{\frac{X(z_c)}{\beta(z_c)} + 2S \int_z^{z_c} X(z') dz'} - \beta_m(z) \quad (5)$$

式中  $\sigma_m(z)$  和  $\beta_m(z)$  分别为大气分子消光系数和后向散射系数.

式(4),(5)中, 高度  $z$  处的大气分子的消光系数  $\sigma_m(z)$  或后向散射系数  $\beta_m(z)$  可以通过美国标准大气模型获得. 如果测量高度较高, 可以选取一段近乎不含气溶胶粒子的清洁大气层, 在这段高度范围内, 对激光雷达距离校正对数回波信号进行最小二乘拟合. 根据 Collis 的斜率法<sup>[14]</sup> 可知, 该回归曲线斜率的一半即为大气分子消光系数, 得到大气分子的消光系数高度分布模型  $\sigma_m(z)$ , 这种取值方法更加切合当时的大气状况. 取其中某一高度作为边界值高度  $z_c$ , 此时边界值  $\sigma(z_c)$  或  $\beta(z_c)$  中就只含有大气分子的成分. 如果测量高度不够高, 可以选取一段较为均匀的大气层, 对该高度范围内激光雷达距离校正对数回波信号进行最小二乘拟合, 回归曲线斜率的一半即为高度  $z_c$  处的边界值  $\sigma(z_c)$  或  $\beta(z_c)$ . 本文在高度  $z_c=4 \text{ km}$  处进行了迭代计算, 获得了气溶胶消光系数的测量结果.

## 3 观测结果及分析

我们于 2006 年 7 月 18 日连续观测了 24 h, 当日天气无云、无风, 实验地点位于西安市东郊一西安理工大学校园内. 图 2 为探测得到的西安城区 24 h 大气气溶胶质量密度时空分布图, 图中的气溶胶后向散射系数  $\beta$  相对变化值用灰度表示出来. 该图可以直观地看到一天之内西安城区上空气溶胶浓度的时空变化. 从日出开始到下午, 由于地表蒸腾以及人类的生产生活等产生的影响, 气溶胶浓度在 200 m~1 km 高度范围内逐渐增强, 到了黄昏, 由于对流逐渐减弱, 气溶胶浓度达到最大. 进入夜晚, 随着地表辐射的迅速降低, 以及人类活动的逐渐减少, 气溶胶浓度逐渐下降, 到凌晨达到最小. 从图 2 中还可看到, 尽管凌晨 0 点~6 点气溶胶浓度相对较低, 但由于剩余层的存在, 高度仍能达到 2 km 左右.

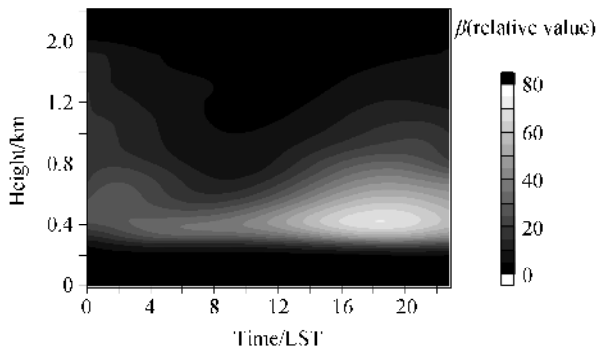


图2 大气气溶胶质量相对密度的时空分布  
(探测日期:2006.07.18. 24 h连续观测)

Fig. 2 The temporal and spatial distribution of atmospheric aerosols of 24 hours taken by continuous observation with lidar at Xi'an city, on July, 18, 2006

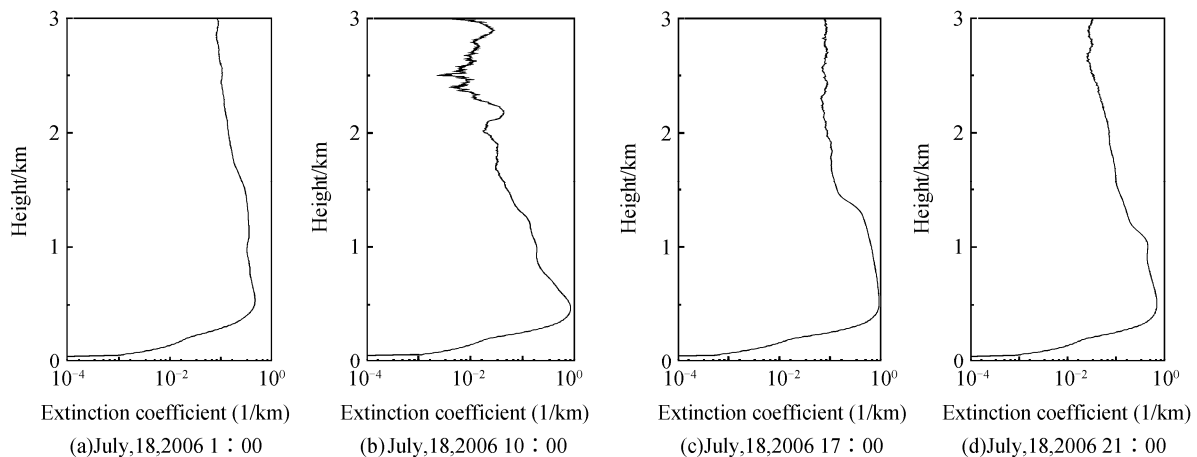


图3 米散射激光雷达探测得到的不同时刻的大气气溶胶消光系数高度分布

Fig. 3 The profiles of aerosol extinction coefficient taken by lidar

安城区上空大气气溶胶粒子浓度的变化规律,下午气溶胶浓度最大,到了晚上9点以后气溶胶浓度明显降低,凌晨最小,并且可以看到气溶胶粒子主要集中在离地面高度1.2 km以下。

## 4 结论

本文开发了一套对人眼安全的355 nm波长米散射激光雷达系统,在西安理工大学校园内对西安城区上空的气溶胶进行了24 h连续观测,首次获得了该地区低层大气气溶胶浓度的高度分布数据,用Klett法精确反演得到气溶胶消光系数数值,并给出了测量结果。从气溶胶浓度-时间-高度分布图上可以清楚观察到:西安城市上空一天24 h气溶胶的变化趋势与人们的日常活动密切相关,气溶胶浓度下午最高,当日气溶胶主要集中在离地面1.2 km高度以下。

### 参考文献

[1] YAN Ji-xiang, GONG Sun-sheng, LIU Zhi-shen. Environmental monitoring lidar[M]. Beijing: Science Press, 2001: 158-161.  
阎吉祥, 龚顺生, 刘智深. 环境监测激光雷达[M]. 北京: 科学出

为了便于对比,本文选择了18日凌晨1点、上午10点、下午5点以及晚上9点四组数据,并用上述的Klett法分别计算了气溶胶消光系数的高度分布如图3,此处对近距离的大气后向散射光未进行几何重叠因子修正。

从图3中可见,凌晨1点时,最大消光系数(单位: $\text{km}^{-1}$ )为0.47,大气中气溶胶粒子含量较低;上午10点时,由于人类活动的影响,最大消光系数增加到0.83;到了下午5点,积累了一天的气溶胶粒子无法散去,因而最大消光系数达到0.92;而到了晚上9点,随着地表辐射的降低和人们活动的减少,气溶胶粒子已开始沉降,粒子浓度逐渐降低,最大消光系数又减到0.69。这4条曲线可以明显观察到西

版社,2001:158-161.

- [2] LIU Cheng, MING Hai, WANG Pei, *et al.* Measurements of the aerosol over Naqu of Tibet and suburb of Beijing by micro pulse lidar (MPL) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1435-1439.  
刘诚, 明海, 王沛, 等. 西藏那曲与北京郊区对流层气溶胶的脉冲激光雷达测量[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1435-1439.
- [3] ZHOU Jun, YUE Gu-ming, QI Fu-di, *et al.* Optical properties of aerosol derived from lidar measurements [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, **15**(3): 140-148.  
周军, 岳古明, 戚福第, 等. 大气气溶胶光学特性激光雷达探测[J]. *量子电子学报*, 1998, **15**(3): 140-148.
- [4] CAMPBELL J R, HLAVKA D L, WELTON E J, *et al.* Full-time, eye-safe cloud and aerosol lidar observation at atmospheric radiation measurement program sites: instruments and data processing [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2002, **19**(4): 431-442.
- [5] SAVOV P B, SKAKALOVA T S, KOLEV I N, *et al.* Lidar investigation of the temporal and spatial distribution of atmospheric aerosols in mountain valleys [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2002, **41**(5): 528-541.
- [6] MA Yong, LIN Hong, JI Hang, *et al.* A scattering coefficient model for airborne lidar detection of red tide [J]. *Acta*

- Photonica Sinica*, 2007, **36**(2):344-349.
- 马泳,林宏,冀航等.基于机载激光雷达监测海洋赤潮模型研究[J].光子学报,2007, **36**(2):344-349.
- [7] BU Ling-bing, LIU Ji-qiao, CHEN Wei-biao. Effect of spectrum uncertainty for direct-detection doppler wind lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2):335-339.
- 卜令兵,刘继桥,陈卫标.光谱稳定性对直接探测多普勒测风激光雷达的影响研究[J].光子学报,2007, **36**(2):335-339.
- [8] ZHONG Zhi-qing, ZHOU Jun, QI Fu-di, *et al.* Portable Mie lidar for monitoring atmospheric aerosol extinction[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(12):1145-1147.
- 钟志庆,周军,戚福第,等.探测大气气溶胶消光系数的便携式米散射激光雷达[J].强激光与粒子束,2003, **15**(12):1145-1147.
- [9] MAO Min-juan, WU Yong-hua, QI Fu-di, *et al.* Mobile dual-wavelength Mie lidar[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(5):677-680.
- 毛敏娟,吴永华,戚福第,等.车载式 1 064 nm 和 532 nm 双波长米散射激光雷达[J].强激光与粒子束,2005, **17**(5):677-680.
- [10] WANG Zhi-hua, WANG Hong-bo, HE Jie, *et al.* Study on the characteristics of atmospheric boundary layer by Mie scattering lidar[J]. *Journal of Light Scattering*, 2006, **18**(2):147-150.
- 王志华,王宏波,何捷,等. Mie 散射激光雷达研究大气边界层特性[J].光散射学报,2006, **18**(2):147-150.
- [11] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments[J]. *Appl Opt*, 1984, **23**(5):652-653.
- [12] KLETT J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Appl Opt*, 1981, **20**:211-220.
- [13] IMAKI M, TAKEGOSHI Y, KOBAYASHI T. Ultraviolet high-spectral-resolution lidar with Fabry-Perot filter for accurate measurement of extinction and lidar ratio [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, **44**(5A):3063-3067.
- [14] COLLIS R T H. Lidar: a new atmosphere probe[J]. *Q J R Meteorol Soc*, 1966, **92**:220-230.

## Ultraviolet Lidar for Profiling of the Urban Atmospheric Aerosol in Spatial and Temporal at Xi'an

LIU Jun, HUA Deng-xin, LI Yan

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Received date: 2006-10-26

**Abstract:** An ultraviolet Mie scattering lidar system has been developed to measure the optical properties of atmospheric aerosol pollutant and its spatial and temporal variations at Xi'an, China. Considering the requirement of eye-safety, a laser at 355 nm is selected as a transmitter. In order to enhance the capability of daytime measurement, the system employs a high-resolution grating to separate the main lidar return; including Mie-Rayleigh scattering signals and solar background signal, according to the wavelength spatially, and then by cooperating with an iris to block the majority of solar background. The lidar system have been operated at Xi'an, and the first results of lidar observation are demonstrated here by observing the aerosol profiles of the extinction coefficient and the spatial-temporal variation properties of aerosol relative mass density, which were obtained within whole-day in one-hour interval.

**Key words:** Lidar; Aerosol; Extinction coefficient; Troposphere



**LIU Jun** was born in 1962 in Xi'an, China. She is an associate professor in the Department of Precision Instrument at Xi'an University of Technology. Her interests are laser remote sensing technology and photoelectric measuring technology.