

文章编号:1004-4213(2010)02-0284-5

# 小型米散射激光雷达的研制及其探测\*

毛建东<sup>1,2</sup>, 华灯鑫<sup>2</sup>, 何廷尧<sup>2</sup>

(1 北方民族大学 电气信息工程学院, 银川 750021)

(2 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

**摘要:**介绍了一台自行研制的用于大气气溶胶光学特性和水平能见度测量的小型米散射激光雷达系统,并进行了一系列观测实验和分析.系统选用 532 nm 波长激光作为光源,采用 Fernald 反演算法对接收到的大气回波信号进行反演得到气溶胶消光系数.通过对西安城区上空的气溶胶光学特性进行连续观测,测得了西安城区不同时刻消光系数的高度分布廓线、以及 24 小时内大气边界层高度的时空变化特性,并对大气水平能见度进行了连续观测,其结果与当地气象部门提供的水平能见度数据的变化趋势基本一致.观测结果表明,利用该米散射激光雷达可以对大气气溶胶光学特性和水平能见度进行有效测量.

**关键词:**米散射;激光雷达;气溶胶;消光系数;水平能见度

**中图分类号:** TN958.98

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20103902.0284

## 0 引言

激光雷达作为一种主动遥感探测工具已有几十年的历史,已广泛用于激光大气传输、全球气候预测、气溶胶辐射效应及大气环境[1]等研究领域.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,使激光雷达技术得到迅速发展,其在大气和气象参量的探测高度、空间分辨率、连续监测以及测量精度等方面所具有的独到优势,是其它探测手段无法比拟的[2-3].

利用激光雷达探测沙尘气溶胶的主要技术手段有:米散射激光雷达[4],偏振激光雷达[5]和高光谱分辨率激光雷达[6].米散射激光雷达是一种用于探测 30 km 以下低空大气中的尘埃、云雾等气溶胶粒子的激光雷达.米散射是指由大气中的各种固态和液态的气溶胶粒子,包括尘埃、烟雾、云层等与激光的相互作用所引起的一种激光波长不产生变化的弹性散射.与其他散射方式相比,米氏散射具有较大的散射截面,从而使米氏散射激光雷达的回波信号通常较大,技术上相对简单,成为探测气溶胶光学特性的有效工具[2,7].我国利用米散射激光雷达进行气溶胶光学特性的探测研究已经开展多年,其中中国科

学院安徽光机所在气溶胶激光雷达研究方面取得了较好的成绩[3,8-9],其他单位也先后利用激光雷达对北京[10]、西藏那曲[11]、成都[12]等地区的大气气溶胶光学特性进行了探测和研究.

西安理工大学最新研制了一台小型米散射激光雷达[2,13-16],可以对大气气溶胶光学特性时空分布以及水平能见度进行测量.本文介绍了该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,并首次利用该米散射激光雷达对西安城区上空的大气气溶胶光学特性进行观测,测得了该地区不同时刻大气气溶胶消光系数高度分布的探测结果,以及气溶胶消光系数 24 小时连续观测的时空变化,并对大气水平能见度进行了连续观测.

## 1 米散射激光雷达系统

自行研制的小型米散射激光雷达如图 1.该系统采用 532 nm 波长的二极管泵浦的 Nd:YAG 激光器作为光源,发射的激光束经准直扩束后,垂直射入大气,被望远镜接收的含有多个波长的回波信号经过小孔光阑、窄带滤光片、透镜聚焦后耦合到多模光纤中,光纤输出光由光电倍增管(PMT)接收.光电倍增管采用模拟工作方式,其输出信号被放大电路放大后,经过 AD 转换,送入计算机进行后续处理.激光雷达系统参量如表 1 [15,16].

\*宁夏高等学校科学研究项目(2007JY006)、国家自然科学基金(40675015)和陕西省教育厅科学技术研究项目(07JK336)资助

Tel:029-82312441

Email:mao\_jiandong@163.com

收稿日期:2008-11-03

修回日期:2008-12-09



图1 米散射激光雷达系统

Fig. 1 The picture of the Mie lidar

图1 小型米散射激光系数参量

Table1 System parameters of compact Mie scattering Lidar

Transmitter	LD-pumped Nd: YAG
Wavelength	532 nm
Pulse energy	6 $\mu$ J
Pulse duration	3 ns
Pulse repetition frequency	1 000 Hz
Beam divergence	0.7 mrad
Receiver	Schmidt-Cassegrain telescope
Diameter	254 mm
Field of view	0.4 mrad
Filter bandwidth	0.3 nm
Detector	PMT; Hamamatsu R3896
Sampling rate	50 MHz
Precision	12 bit A/D
Range resolution	3 m
Measurement range	2 00m-10 000 m
Operation	Automated, or manual
Elevation angle	0~90°
Azimuth angle	0~360°

在该激光雷达系统中,放大电路采用高增益、低噪声、高输入阻抗、低输出阻抗的高速运算放大器,实现了高增益放大,低阻抗输出,既保证了信号的高增益的动态特性又保证了信号的频率特性,改善了激光雷达探测的动态特性.另外,考虑到气溶胶观测需要全天候进行,因此在此激光雷达系统中,采用窄带干涉滤光片对太阳背景光、天空背景光进行了高精度剔除,提高白天测量的信噪比.

另外,在该小型米散射激光雷达系统中,为了使系统能够对大气气溶胶进行水平、斜程和垂直等角度扫描探测,我们设计了一个二维扫描系统来控制激光雷达发送接收部分的转动以及扫描.该扫描系

统仰角转动范围为 0-90°,水平方位角转动为 0-360°.在设计中,分别用两个步进电机来驱动整个发送接收系统的仰角和水平方位角的转动,所选用的步进电机步距角为 1.8°,驱动器 24 细分,控制精度为 0.028°.同时采用上下位机的形式对扫描系统的扫描转动进行控制,其原理框图如图 2<sup>[15]</sup>.

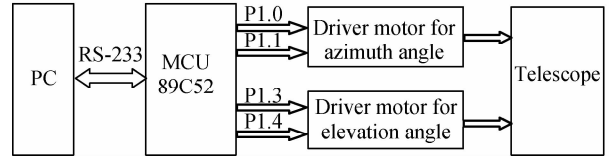


图2 二维扫描系统框图

Fig. 2 The schematic diagram of the scanning control system

## 2 数据反演方法

米散射激光雷达方程如下<sup>[17]</sup>

$$P(z) = ECz^{-2} [\beta_M(z) + \beta_A(z)] \cdot \exp \left\{ -2 \int_0^z [\alpha_M(z') + \alpha_A(z')] dz' \right\} \quad (1)$$

式中,  $P(z)$  是距离  $z$  处的激光回波信号功率;  $E$  是激光发射能量;  $C$  是标定系统常数,包括发射、接收系统的光学损失,接收系统的有效接收面积;  $\beta_M(z)$ 、 $\beta_A(z)$  分别是距离  $z$  处的大气分子、气溶胶后向散射系数,其和为大气总后向散射系数  $\beta(z)$ ;  $\alpha_M(z)$ 、 $\alpha_A(z)$  分别是距离  $z$  处大气分子、气溶胶消光系数,其和为总消光系数  $\alpha(z)$ .

由式(1)可以看出,利用激光雷达接收到的回波信号反演大气气溶胶消光系数或后向散射系数时,由于激光回波信号中包含着后向散射系数和消光系数这 2 个大气参量的信息,反演过程中就需要对大气的状态等做一些假设,如假设一个雷达比系数(气溶胶的消光系数与散射系数之比)等,常用的算法主要有 Collis 斜率法<sup>[18]</sup>、Klett 法<sup>[19]</sup>及 Fernald 法<sup>[17]</sup>.其中,Fernald 反演方法在 Klett 法的基础上将分子和气溶胶的贡献分开考虑,即分别考虑大气分子和气溶胶对激光的散射效应<sup>[20]</sup>.因此,本文采用 Fernald 法对气溶胶的消光系数、后向散射系数参量进行反演.

如果已知参考高度  $z_c$  处的气溶胶粒子和大气分子的消光系数  $\alpha_A(z_c)$ 、 $\alpha_M(z_c)$ ,则  $z_c$  处以下各高度上的气溶胶消光系数为<sup>[17,20]</sup>

$$\alpha_A(z) = -\frac{S_A}{S_M} \alpha_M(z) + \frac{z^2 P(z) \exp \left[ 2 \left( \frac{S_A}{S_M} - 1 \right) \int_z^{z_c} \alpha_M(z') dz' \right]}{\alpha_A(z_c) + \frac{S_A}{S_M} \alpha_M(z_c) + 2 \int_z^{z_c} z'^2 P(z') \exp \left[ 2 \left( \frac{S_A}{S_M} - 1 \right) \int_z^{z'} \alpha_M(z') dz' \right] dz'} \quad (2)$$

式中,  $S_M = \alpha_M / \beta_M = 8\pi/3$ , 为大气分子消光系数与后向散射系数比;  $S_A = \alpha_A / \beta_A$ , 是气溶胶消光系数与后向散射系数比, 对于背景期的平流层和对流层气溶胶, 根据参考文献[4, 20]可以取  $S_A = 50$  sr.

对于参考高度  $z_c$  处的气溶胶粒子和大气分子的消光系数  $\alpha_A(z_c)$ 、 $\alpha_M(z_c)$ , 可以通过美国标准大气模型计算获得. 当然, 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, 如对流层顶部某一高度作为参考高度  $z_c$ . 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, 这种取值方法更加切合当时的大气状况[2].

另外, 应用激光雷达系统来探测大气能见度也是国内外研究的热门课题, 它有其他探测手段所不具备的优势. 它通过对回波信号的处理得到水平程的大气消光系数, 然后根据具体的公式来推得水平程的大气能见度. 大气水平能见度  $R_V$  与人眼最为敏感的 550 nm 波长大气水平消光系数  $\sigma_H$  及人眼的对比阈值  $\epsilon$  之间的关系为[21]

$$R_V = \frac{1}{\sigma_H} \ln \frac{1}{\epsilon} = \frac{1}{\sigma_H} \ln \frac{1}{0.02} = \frac{3.912}{\sigma_H} \quad (3)$$

### 3 大气边界层及水平能见度观测结果与分析

图 3 为 2008 年 3 月 3 日, 利用该小型米散射激光雷达在西安理工大学(北纬  $34^{\circ}15'$ , 东经  $108^{\circ}59'$ ) 对西安城区的大气气溶胶光学特性进行观测, 并利用 Fernald 方法反演得到的气溶胶消光系数高度分布图, 该图分别选择了这一天的 4 个时刻的数据.

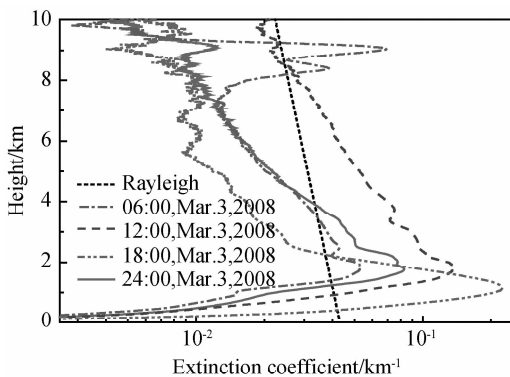


图 3 大气气溶胶消光系数廓线

Fig. 3 The profiles of aerosol extinction coefficient

从图 3 中可以看出, 在凌晨 6 点时, 大气底层气溶胶消光系数最大值为  $0.05 \text{ km}^{-1}$ , 反映了此时大气中的气溶胶含量较低, 此外, 在高度 7.5 至 9.5 处明显存在厚度约为 2 km 的卷云层, 该卷云层的消光

系数最大为  $0.075 \text{ km}^{-1}$ ; 到中午 12 点时, 由于人类活动的逐渐增强, 消光系数最大值升为  $0.14 \text{ km}^{-1}$ , 大气中气溶胶含量较高; 到下午 18 点, 积累了一天的气溶胶在空气中大量聚集, 消光系数达到最大  $0.24 \text{ km}^{-1}$ ; 进入夜晚后, 人类活动逐渐减少, 气溶胶浓度下降, 这从 24 点的消光系数最大值为  $0.16 \text{ km}^{-1}$  就可以看出. 图中点划线是大气分子的消光系数垂直廓线.

图 4 为当距离分辨率为 3 m, 移动平均点数取 20, 积分时间为 2 min, 累计脉冲数为 120 000 时, 该米散射激光雷达系统信噪比(SNR)的高度分布. 从图 3 可以看出, 探测信号信噪比 SNR 大于 10 时的最大探测高度白天约为 8 km, 夜晚约为 10 km.

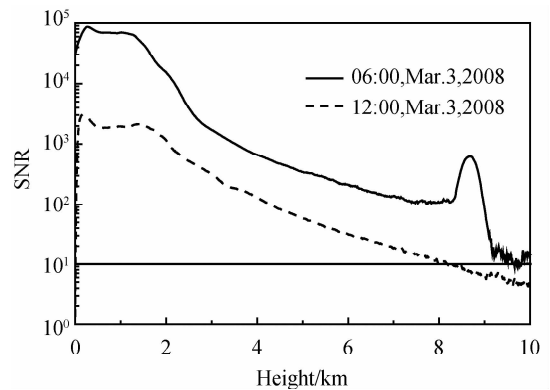


图 4 系统信噪比(SNR)的高度分布

Fig. 4 The ratio of signal to noise versus height

由于大气中覆盖逆温的作用, 使得大量的大气气溶胶粒子富集在大气边界层以内[22], 大气边界层与其上方自由大气相比, 含有更多的气溶胶, 使得激光雷达在的后向散射信号非常的强, 而在大气边界层和其上空的自由大气层之间的过渡区域内, 大气气溶胶的浓度会逐渐发生变化, 因此在大气边界层内, 往往将气溶胶作为大气边界层高度动态变化的示踪剂. 为了更直观地利用小型米散射激光雷达观测大气边界层高度随时间变化的趋势, 我们为小型米散射激光雷达编制了能直观反映大气边界层高度的消光系数的时空变化特性的 THI(time-height-indication)图. 图 5 为 2008 年 3 月 25 日晚 20 点到

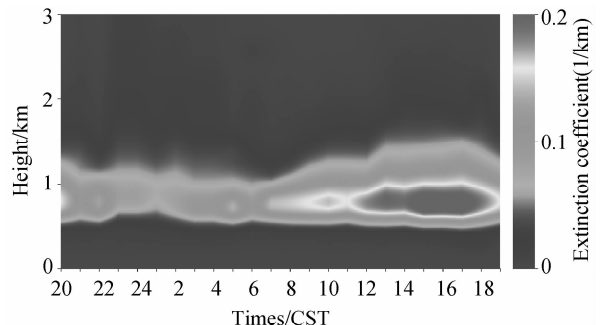


图 5 大气气溶胶消光系数 24 小时的时空分布

Fig. 5 The temporal and spatial distribution of atmospheric aerosols extinction coefficient of 24 hours

次日晚 19 点连续观测的 24 小时的大气气溶胶消光系数的时空分布,平均测量间隔为 1 小时。

从图 5 中,可以明显的看出一天中大气边界层的变化趋势:从晚上 20 点后,由于随着地表辐射的迅速降低,温度下降,以及人类活动的逐渐减少,气溶胶浓度逐渐下降,边界层高度应该逐渐减小,进入凌晨以后,由于地面温度比较低,湿度较大,气溶胶粒子的大气污染物接近地面,边界层高度进一步下降;到早上 8 点至 9 点,由于太阳辐射的增强、地表蒸腾、上班的机动车尾气污染以及人类活动的增强,气溶胶浓度逐渐增大,边界层高度逐渐升高;到下午 2 点至 3 点,温度达到最高,并为少云的天气,因此边界层高度继续升高;下午 5 点左右,积累了一天的气溶胶在空气中大量聚集边界层内,此时的边界层高度达到最大<sup>[16]</sup>。

另外,利用小型米散射激光雷达还可以进行水平能见度的探测,由于观测地点位于 13 层教学楼顶,距离地面高度为 50 m,因此主要探测的是该高度下西安城区的水平能见度参量。3 月 22 日到 3 月 31 日,我们利用该米散射激光雷达实验系统对西安城区大气水平能见度进行了连续探测。由于激光雷达测量的消光系数水平分布一般情况下是不均匀的,因此本文在测量时采用累加平均、反演数据时采用移动平均的方法来降低不均匀的影响。图 6 为该米散射激光雷达探测到的水平能见度变化趋势与当地气象部门提供的数据之间的比较。可以看出,该米散射激光雷达探测结果与气象部门提供的水平能见度数据的变化趋势基本一致。

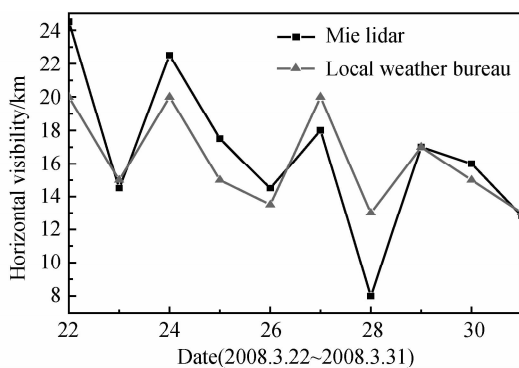


图 6 激光雷达探测的水平能见度变化趋势与当地气象部门提供的数据之间的比较

Fig. 6 The variation of horizontal visibility versus day taken by lidar and the local weather bureau data

从图 6 中可以看出,22 日雨雪天气后的 24 日晴天能见度相当高。28 日阴天小雨,水气加强光的吸收和散射作用,能见度很低。此后的连续晴天,气温升高,空气干燥,灰尘增多,能见度随之下降,这是典型的西北气候特征<sup>[16]</sup>。

## 4 结论

本文介绍了自行开发的可用于大气气溶胶光学特性和水平能见度测量的一套小型米散射激光雷达系统构成及系统参量。该激光雷达探测信号信噪比 SNR 大于 10 时的最大探测高度白天约为 8 km,夜晚约为 10 km。通过对西安城区上空气溶胶光学特性进行连续观测,利用 Fernald 算法反演得到了该地区不同时刻消光系数的高度分布廓线,绘制了反映 24 小时内气溶胶消光系数的时空变化特性 THI 图,直观的得到了该地区大气边界层高度的日变化趋势;同时对大气水平能见度进行了连续观测,其结果与气象部门提供的水平能见度数据的变化趋势基本一致。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] LIU Jun, HUA Deng-xin, LI Yan. Ultraviolet lidar for profiling of the urban atmospheric aerosol in spatial and temporal at Xi'an [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(8): 1534-1537.  
刘君,华灯鑫,李言.紫外域激光雷达探测西安城区上空大气气溶胶时空剖面[J]. *光子学报*, 2007, **36**(8): 1534-1537.
- [3] 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): 1146-1147.  
钟志庆,周军,戚福弟,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): 1146-1477.
- [4] SASANO Y. Tropospheric aerosol extinction scanning lidar measurements over Tsukuba, Japan, from coefficient profiles derived from 1990 to 1993 [J]. *Appl Opt*, 1996, **35**(24): 4941-4952.
- [5] JWASAKA Y, HAYASHIDA S. The effects of the volcanic eruption of st. helens on the polarization properties of stratospheric aerosol; lidar measurement at Nagoya [J]. *J Meteor Soc Japan*, 1981, **59**(4): 611-614
- [6] SHIPLEY S T, TRACY D H, ELORANTA E W, *et al.* High spectral resolution lidar to measure optical scattering properties of atmospheric aerosols [J]. *Appl Opt*, 1983, **22**(23): 3716-3724.
- [7] YAN Ji-xiang, GONG Shun-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:科学出版社, 2001: 158-161.
- [8] WU Yong-hua, HU Huan-ling, ZHOU Jun, *et al.* Measurements of stratosphere aerosol with L625 lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 1012-1015.  
吴永华,胡欢陵,周军,等. L625 激光雷达探测平流层气溶胶 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(8): 1012-1015.
- [9] ZHOU Jun, YUE Gu-ming, JIN Chuan-jia, *et al.* Two-wavelength Mie lidar for monitoring of tropospheric aerosol [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1412-1417. 1012-1015.  
周军,岳古明,金传佳,等.探测对流层气溶胶的双波长米式散射激光雷达[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1412-1417.

- [10] QIU Jin-huan, ZHENG Si-ping, HUANG Qi-rong, *et al.* Lidar measurement s of cloud and aerosol in t he upper troposphere in beijing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, **27**(1):1-7.  
邱金桓, 郑斯平, 黄其容, 等. 北京地区对流层中上部云和气溶胶的激光雷达探测[J]. *大气科学*, 2003, **27**(1):1-7.
- [11] 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.
- [12] WANG Hong-bo, WANG Zhi-hua, HE Jie, *et al.* Lidar measurements of the lower cloud in Chengdu [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2):350-354.  
王宏波, 王治华, 何捷, 等. 成都地区中低云层的激光雷达探测[J]. *光子学报*, 2007, **36**(2):350-354.
- [13] LIU Jun, HUA Deng-xin, LI Yan, *et al.* Design of a compact Mie lidar system [J]. *Journal of Xi'an Univisity of Technology*, 2007, **23**(1):1-5.  
刘君, 华灯鑫, 李言, 等. 小型米散射激光雷达系统设计[J]. *西安理工大学学报*, 2007, **23**(1):1-5.
- [14] ZHOU A-wei, HUA Deng-xin, ZHOU Yi, *et al.* Visualizing retrival technology of the lidar atmospheric parameters[J]. *Journal of Xi'an Univisity of Technology*, 2008, **24**(2):206-209.  
周阿维, 华灯鑫, 周毅, 等. 激光雷达探测大气参量的可视化反演技术[J]. *西安理工大学学报*, 2008, **24**(2):206-209.
- [15] XU Li-ming. Development of a compact Mie lidar system for atmospheric aerosol detection[D]. Xi'an; Xi'an University of Technology, 2008, 3.  
徐黎明. 大气气溶胶探测小型 Mie 散射激光雷达系统的设计[D]. 西安:西安理工大学, 2008, 3.
- [16] HE Ting-yao. Development of a compact Mie lidar and its applications[D]. Xi'an; Xi'an University of Technology, 2009, 3.  
何廷尧. 小型 Mie 散射激光雷达的研制及其应用[D]. 西安:西安理工大学, 2009, 3.
- [17] FREDERICK G F. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments[J]. *Appl Opt*, 1984, **23**(5):652-653.
- [18] COLLIS R T H. Lidar: a new atmosphere probe[J]. *Q J R Meteorol Soc*, 1966, **92**:220-230.
- [19] KLETT J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Appl Opt*, 1981, **20**(2):211-220.
- [20] LI Hong-jing. Study of atmospheric extinction properties over Suzhou city with 1 064 nm lidar [D]. Suzhou: Soochow University, 2005, **5**:30.  
李洪敬. 苏州城区 1 064 nm 激光雷达大气消光特性的研究[D]. 苏州:苏州大学, 2005, **5**:30.
- [21] XIE Chen-bo, HAN Yong, LI Chao, *et al.* Mobile lidar for visibility measurement[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2005, **17**(7):971-975.  
谢晨波, 韩永, 李超, 等. 车载式激光雷达测量大气水平能见度[J]. *强激光和粒子束*, 2005, **17**(7):971-975.
- [22] WANG Zhen-zhu, LI Ju, ZHONG Zhi-qing, *et al.* Lidar exploration of atmospheric boundary layer over down town of Beijing in summer[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, **29**(1):96-100.  
王珍珠, 李炬, 钟志庆, 等. 激光雷达探测北京城区夏季大气边界层[J]. *应用光学*, 2008, **29**(1):96-100.

## A Compact Mie Scattering Lidar and its Observation

MAO Jian-dong<sup>1,2</sup>, HUA Deng-xin<sup>2</sup>, HE Ting-yao<sup>2</sup>

(1 School of Electrical and Information Engineering, North University for Nationalities, Yinchuan 750021, China)

(2 School of Mechanical & Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** A compact Mie scattering lidar system at a wavelength of 532 nm is developed to measure the optical properties of atmospheric aerosol particles and horizontal visibility. Some observations are performed and analyzed. The Fernald method is employed to retrieve the extinction coefficient of aerosol. Some continuous continual experiments are carried out for verifying the feasibility of the Mie scattering lidar at Xi'an area, and the observation results are demonstrated here by measuring the aerosol profiles of the extinction coefficient, the spatial temporal variation of atmospheric boundary layer height which are obtained within whole day at one hour interval, and the horizontal visibility which agrees with the data obtained from the local weather bureau. The observation results show that the Mie scattering lidar is capable of measuring efficiently the optical properties of atmospheric aerosol particles and horizontal visibility.

**Key words:** Mie scattering; lidar; Aerosol; Extinction coefficient; Horizontal visibility



**MAO Jian-dong** was born in 1975. He is an associate professor at School of Electrical and Information Engineering, North University for Nationalities. Now he is pursuing his Ph. D. degree at Xi'an University of Technology, and his research interests focus on laser remote sensing technology.



**Hua Deng-xin** was born in 1964. He received the doctor degree from University of Fukui, Japan in 2005. He is a professor of the College of Mechanical & Precision Instrument Engineering at Xi'an University of Technology (XAUT). His research interests are mainly in the field of lidar system development and application.