

文章编号: 0253-2239(2004)08-1025-7

AML-1 车载式大气污染监测激光雷达样机研制*

张寅超 胡欢陵 谭 锬 刘小勤 邵石生 杨高潮 邓 敏 张高勇 杨陆军
(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要: 针对环境监测工作的迫切需要, 开发研制了我国第一台车载式大气污染监测激光雷达。它具有测量范围大, 距离分辨率高、数据可靠、灵敏度高等特点, 并通过驱动单元能进行空间三维探测。该雷达系统能监测四种大气污染物, 即大气气溶胶、二氧化硫、二氧化氮和臭氧。大气二氧化硫、二氧化氮、臭氧的最高探测灵敏度分别为 0.01 mg/m^3 、 0.04 mg/m^3 、 0.01 mg/m^3 , 气溶胶的消光系数探测限为 10^{-4} km^{-1} , 最高探测空间分辨力为 7.5 m , 最大探测距离为 $3 \sim 10 \text{ km}$ 。介绍了其基本原理、关键技术和运行情况。

关键词: 大气光学; 车载激光雷达; 二氧化硫; 二氧化氮; 臭氧; 气溶胶
中图分类号: TH765.8; TN959.6 文献标识码: A

Development of a Mobile Lidar System for Air Pollution Monitoring

Zhang Yinchao Hu Huanling Tan Kun Liu Xiaoqin Shao Shisheng Yang Gaochao
Deng Min Zhang Gaoyong Yang Lujun

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

(Received 16 June 2003; revised 24 October 2003)

Abstract: A mobile differential absorption lidar (DIAL) system for atmospheric pollution measurements has been developed. It is the first mobile system for air pollution monitoring in China. This lidar system allows three-dimensional measurements by using a steering unit, and can measure four kinds of pollutants in atmosphere — aerosol, SO_2 , NO_2 , and O_3 . The lower detection limit of the SO_2 , NO_2 , O_3 , and aerosol's extinction coefficient is 0.01 mg/m^3 , 0.04 mg/m^3 , 0.01 mg/m^3 , and 10^{-4} km^{-1} respectively. The best spatial resolution and maximum measurement range are 7.5 m and about $3 \sim 10 \text{ km}$ respectively. Using this system, range-resolved measurements with high sensitivity over large areas can be made. The lidar system in some detail and its performance are described.

Key words: atmospheric optics; mobile lidar; SO_2 ; NO_2 ; O_3 ; aerosol

1 引 言

发展光学方法探测手段是目前大气探测研究领域十分重要的一项工作^[1~3], 激光雷达技术研究是其中的一个重要内容。激光雷达大气污染监测具有传统的取样和接触式测量难以具备的优点, 它可以对大范围的大气污染进行连续、实时、快速的遥感监

测, 具有很高的时空分辨率^[4~7], 可以快速获得污染物的水平范围的分布以及垂直结构, 和进行污染源排放源的非接触式监测和对污染物扩散进行跟踪。激光雷达大气污染测量系统将越来越多地用于大气污染的监测和研究, 已成为大范围快速监测大气环境的新一代高技术手段^[8]。为此, 中国科学院安徽光学精密机械研究所进行了车载式大气污染监测激光雷达系统的研制开发工作。车载测污激光雷达是光学、精密机械、弱信号探测和获取、计算机等高精技术的集成, 因而该项工作的进行不仅具有科学意义、社会和经济意义, 同时还将推动我国大气环境监测学科和相关的机电及控制技术的发展。

* 国家 863 计划信息获取车处理技术主题重点项目 (863-308-14-03)、中国科学院重大项目 (KY951-A1-503) 资助课题。

E-mail: yczhang@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2003-06-16; 收到修改稿日期: 2003-10-24

2 基本探测原理

2.1 激光雷达方程

当波长为 λ_i 、脉冲能量为 E_i 的激光发射到大气中,激光雷达接收到的从距离 R 、厚度为 ΔR 的大气的回波光光子数 $P_i(R)$,可以由激光雷达方程得^[8,9]

$$P_i(R) = \frac{E_i \beta_i(R) \Delta R A y(R) \eta_1 \eta_2}{R^2 (hc/\lambda_i)} \times \exp\left\{-2 \int_0^R [\alpha_i(R') + N(R') \sigma_i] dR'\right\}, \quad (1)$$

这里 A 是接收望远镜面积, η_1 是光电倍增管量子效率, η_2 是接收光学系统效率, h 是普朗克常量, c 是光速, $N(R)$ 是距离 R 处的被测污染气体分子浓度, $y(R)$ 是发射激光与接收视场重叠几何因子, σ_i 是波长为 λ_i 的被测污染气体分子吸收截面。大气后向散射系数 $\beta_i(R)$ 和消光系数 $\alpha_i(R)$ 包括气体分子(M)和气溶胶(A)两部分:

$$\beta_i(R) = \beta_{Mi}(R) + \beta_{Ai}(R), \quad (2)$$

$$\alpha_i(R) = \alpha_{Mi}(R) + \alpha_{Ai}(R), \quad (3)$$

2.2 污染气体的差分吸收测量

车载测污激光雷达进行大气污染气体测量所用的基本原理是差分吸收测量(DIAL),即利用待测气体分子的吸收特性测量该气体的浓度。差分吸收测量激光雷达向大气中的同一光路发射波长接近的两束脉冲激光,其中一个波长正处于待测气体的吸收线上,记为 λ_{on} ,它被待测气体较强烈吸收;另一波长处于待测气体的吸收线的边翼上或吸收线外,记为 λ_{off} ,待测气体对它吸收很小或没有吸收。由于这两束激光波长相近,其它气体分子和气溶胶对于这两个波长的消光一般情况下基本相同,可以忽略。两束激光的回波强度的差异只是由待测气体分子的吸收所引起的,从而根据两个波长回波强度的差分可以确定待测气体分子的浓度。

差分吸收测量方法中还利用待测气体的吸收和大气(包括大气气体分子和气溶胶)弹性后向散射的原理,一般在所选择波长 λ_{on} 处的气体吸收截面较大,并且大气气体的弹性后向散射截面很大,回波强度较大易于接收测量。这两个因素结合在一起,形成差分吸收方法测量的高灵敏度,再加上激光雷达的很高的距离分辨率和大范围实时测量的特点,使差分吸收测量激光雷达成为测量气体分子浓度空间分布的一种有力工具。

若选择的两个波长 λ_{on} 、 λ_{off} 分别对应于被测气体分子的强吸收和弱吸收,则由上述激光雷达方程可以

将被测气体分子浓度解 $N(R)$ 写成下面的形式^[9]:

$$N(R) = \frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dR} \left[-\ln \frac{P_{on}(R)}{P_{off}(R)} + \ln \frac{\beta_{on}(R)}{\beta_{off}(R)} \right] - \frac{\alpha_{on}(R) - \alpha_{off}(R)}{\Delta\sigma}, \quad (4)$$

其中被测气体分子吸收截面差为 $\Delta\sigma = \sigma_{on} - \sigma_{off}$,大气后向散射系数分别为 $\beta_{on} = \beta_{Mon} + \beta_{Aon}$ 和 $\beta_{off} = \beta_{Moff} + \beta_{Aoff}$,除被测气体分子外的大气消光系数分别为 $\alpha_{on} = \alpha_{Mon} + \alpha_{Aon}$ 和 $\alpha_{off} = \alpha_{Moff} + \alpha_{Aoff}$ 。

上述激光雷达方程是本激光雷达系统设计及其数据处理软件研制中所利用的基本方程。

2.3 AML-1 大气监测激光雷达样机原理结构图

根据国内及国际上相关技术的发展状况,及依据安徽光机所在激光雷达研制方面的技术积累,研制完成的车载测污激光雷达是基于差分吸收测量(DIAL)基本原理,所采用的原理框图如图1所示。该测污激光雷达系统主要由激光光源、激光发射与接收光学及机械系统、信号接收采集系统、控制系统、数据处理软件、系统软件等部分组成。扫描平镜能进行俯仰和方位转动,以实现三维空间立体扫描。通过自动控制指令控制扫描平镜的俯仰和方位转动,使发射光束射向被测大气,被测大气的后向散射光信号由扫描平镜反射到接收主镜,通过小孔光阑、光纤、衰减片、窄带滤光片到达光电倍增管,前置放大器 and 数据采集部分对光电倍增管输出的微弱电信号进行处理,获取测量数据、并传送到计算机,数据处理软件对测量数据进行处理,获取被测污染物的浓度,并显示污染物的空间分布。激光雷达系统具有较高的自动化程度,系统的操作、数据处理和显示等基本由系统软件控制进行。系统的主要技术参量如表1所列。

Table 1 Specification of the mobile lidar system

Pollutant measured		SO ₂ , NO ₂ , O ₃ , aerosols	
Telescope diameter		300 mm	
Digitizer		12 bit, 40 MHz	
Detectors		EMT PMT	
Output energy and wavelength	Titanium sapphire laser	260~287 nm	≥4 mJ
	Nd:YAG laser	390~400 nm	≥15 mJ
		532 nm	~30 mJ
Horizontal scanning		-180°~180°	
Vertical scanning		-10°~100°	
Measurement time		day and night	

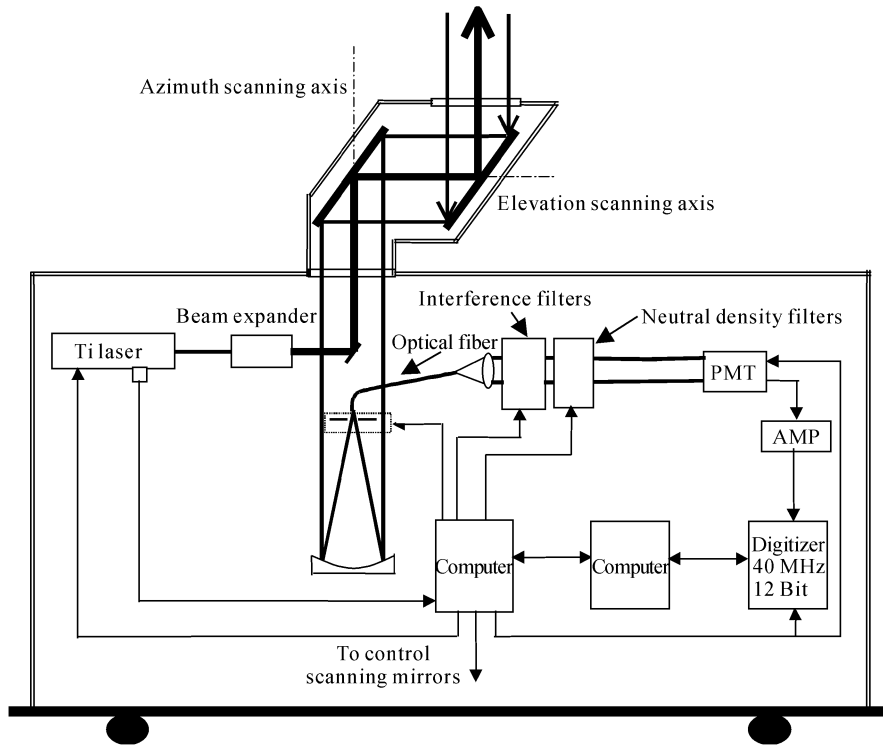


Fig. 1 Schematic diagram of mobile lidar system

3 车载大气污染监测激光雷达系统调试及测量结果

依据上述设计方案和设计参量,研制完成了如图 2 所示的车载测污激光雷达系统。为了验证雷达系统运行的可靠性,进行了一系列的试验测量工作。测量数据采集最小间距分辨力为 7.5 m,对测量得到的回波信号数据,首先进行扣背景和滑动平滑处理。在浓度反演处理时差分距离取 200~500 m,有关大气温度和气压的垂直分布数据以及分子消光数据分别取自美国中纬度标准大气模式(1976 年)^[10] 和 Eltermann 模式^[11]。



Fig. 2 Mobile lidar system

3.1 雷达系统测量数据可靠性实验研究

雷达系统首先对大气气溶胶分布进行了实验测量,并且与安徽光机所 L300 激光雷达系统^[7]的测量结果进行了对比。L300 激光雷达已进行气溶胶垂直分布常规监测近十年,其探测数据可靠。

图 3 中分别是研制完成的 AML-1 测污激光雷达及 L300 激光雷达测量的气溶胶消光系数的垂直分布曲线。图中点画线是 L300 激光雷达的测量数据,实线是测污激光雷达的测量数据。

测污激光雷达测量结果与 L300 激光雷达测量

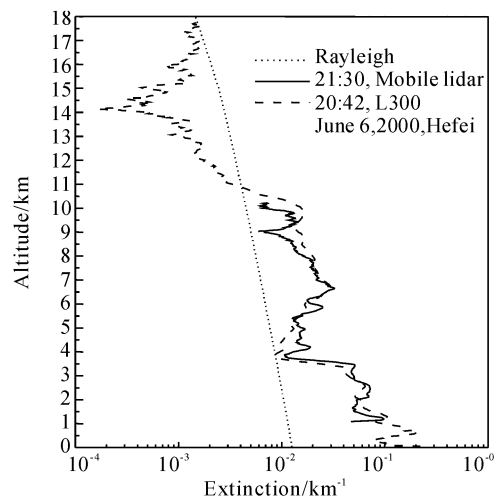


Fig. 3 Comparison of aerosol measurements by L300 and mobile lidar system

结果相比,在 10 km 内十分一致,表明 AML-1 测污激光雷达的光学、机械、电子学、及数据处理软件等部分都已能正常工作,并系统能获得可靠的回波信号数据。

为了进一步验证系统测量数据的可靠性,还进行了水平大气消光系数测量。在测量中风速比微风略强,这样由于风的搅拌作用可假设在测量距离内水平大气均匀,即大气消光系数与距离无关,为一常数。考虑到电子学系统的作用,激光雷达方程(1)可写成如下形式:

$$V(R) = \frac{B(R)E\beta(R)A_y(R)\eta_1\eta_2}{R^2(hc/\lambda)} \times \exp\left\{-2\int_0^R[\alpha(R') + N(R')\sigma]dR'\right\}, \quad (5)$$

式中 $B(R)$ 是信号接收部分中光电倍增管后电子学部分的信号传递函数。在水平均匀条件下,上式可简化为

$$V(R)R^2 = CB(R) \cdot y(R)\exp(-2R\alpha'), \quad (6)$$

其中 $C = \frac{E\beta A\eta_1\eta_2}{hc/\lambda}$, $\alpha' = \alpha + N\sigma$ 。

对(6)式取对数有

$$\ln[V(R)R^2] = \ln[CB(R) \cdot y(R)] - 2R\alpha'. \quad (7)$$

根据上述所讨论的方法及大气条件,测污激光雷达测量得到的水平测量结果如图 4 所示。

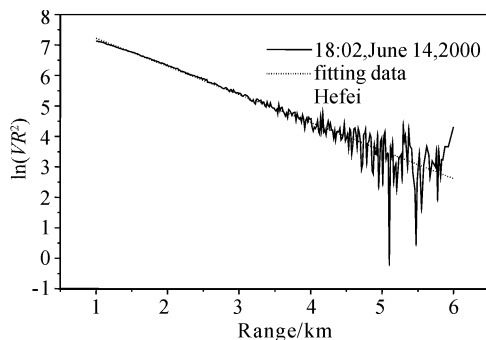


Fig. 4 Lidar received signal with uniform horizontal atmosphere

从上图能看到,直到 4.5 km $\ln(VR^2)$ 与距离 R 都有较好的线性关系,即(7)式中右边第一项在该范围内为常量,这也进一步表明雷达系统对回波信号接收没有畸变效应,即雷达系统能获得可靠的回波信号数据。

3.2 大气气溶胶探测

图 5 给出的是 2000 年 6 月 6 日、7 月 21 日、7 月 26 日和 7 月 31 日测量得到的垂直大气气溶胶消光系数结果,所用激光波长是 532 nm。图中结果显

示气溶胶消光系数的垂直分布是不一样的,有明显的结构,不同日期相同高度的气溶胶消光系数值的差别可达一个量级以上。图中数据还显示,研制完成的测污激光雷达的气溶胶消光系数垂直探测距离可达 10 km,并且可探测得到 10^{-4} km^{-1} 量级的气溶胶消光系数值。

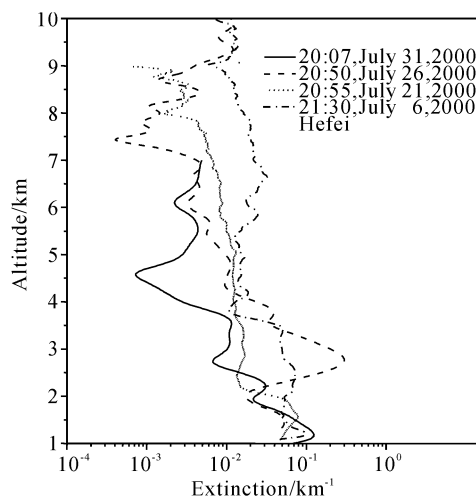


Fig. 5 Vertical profiles of aerosol extinction coefficients measured by the mobile lidar system

3.3 SO₂ 探测

SO₂ 探测所选用的波长分别是 286.9 nm(on)和 286.3 nm(off),其相应的差分吸收截面为 $3.86 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 。图 6、图 7 是探测得到的 SO₂ 浓度的水平分布,图 8 是 SO₂ 浓度的垂直分布,除图 6 中数据为晚上测量外,其它都为白天测量。从图中能看到水平和垂直探测距离都能达到 5.5 km。SO₂ 水平及垂直分布不是很均匀,有一定的结构,但多在 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以内,这与环境监测站给出的数据较好符合。对于水平测量,我们计算了测量范围内 SO₂ 浓度的平均值,该值与环境监测站同时得到的数据十分吻合,其差别小于 $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$,因而探测精密度达到 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的设计要求。例如,图 6 中数据平均值为 $0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$,

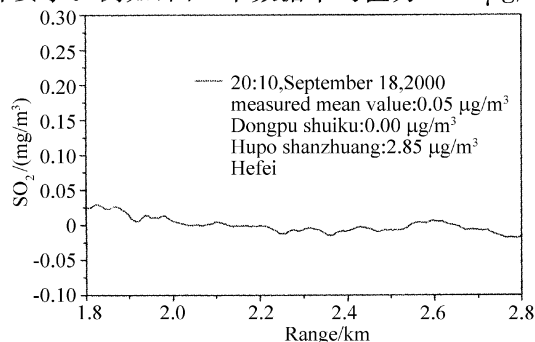


Fig. 6 SO₂ horizontal profile measured by the mobile lidar system

琥珀山庄(在本激光雷达东偏南方向约10 km处)和董铺水库(距本激光雷达约50 m)环境监测站数据分别为 $2.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 图 7 中数据平均值为 $3.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 董铺水库环境监测站数据为 $1.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

图 8(c)中给出了两次十分接近的测量结果, 它们的测量时间分别为15:59分和16:08。二曲线非常相近, 这也表明研制完成的测污光雷达系统的测量结果是稳定可靠的。

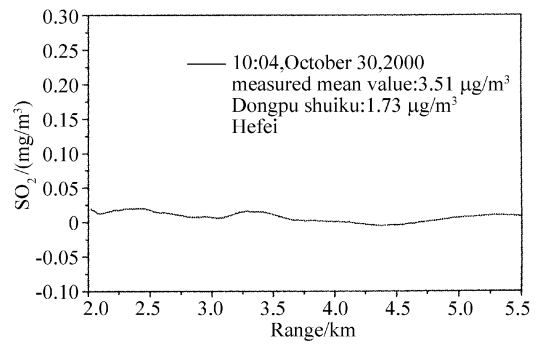


Fig. 7 SO₂ horizontal profile measured by the mobile lidar system

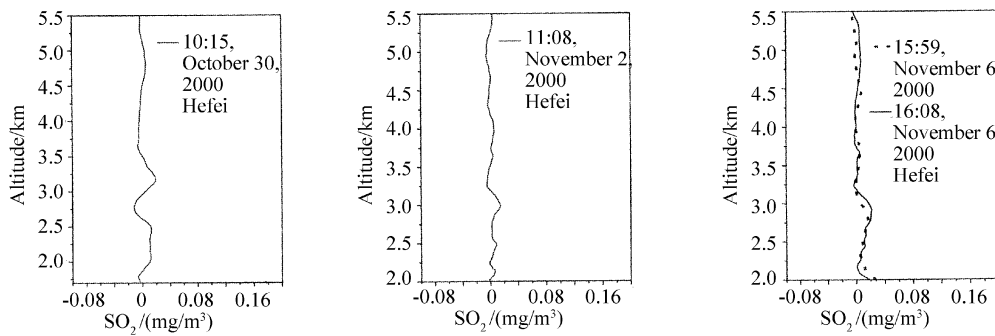


Fig. 8 SO₂ concentration vertical profiles measured by the mobile lidar system

3.4 O₃ 探测

O₃ 探测所选用的波长分别是 282.4 nm (on)和 286.3 nm (off), 其相应的差分吸收截面 $\Delta\sigma$ 可分别从下列表达式计算得出^[12]:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\text{on}} - \sigma_{\text{off}}, \tag{8}$$

$$\sigma_{\text{on}} = [313.1 + (6.8346 \times 10^{-2})T - (1.486 \times 10^{-3})T^2] \cdot 1.0 \times 10^{-24} (\text{m}^2), \tag{9}$$

$$\sigma_{\text{off}} = [211.04 + (1.149 \times 10^{-1})T - (4.756 \times 10^{-4})T^2] \cdot 1.0 \times 10^{-24} (\text{m}^2), \tag{10}$$

式中 T 是温度。图 9, 图 10 是 O₃ 水平测量结果, 图 11是 O₃ 垂直测量结果。其中 2 次为白天测量。从图中能看到, O₃ 浓度一般小于 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 探测距离可达到 4 km。从图中能看到, 不同日期 O₃ 的垂直分布曲线差别很大, 但同一天中相近的两次测

量结果仍然是非常相近的, 这也进一步说明了雷达系统的稳定可靠性。对于水平测量, 我们计算了测量范围内 O₃ 浓度的平均值。11 月 6 日数据的测量平均值是 $10.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 同时间琥珀山庄环境监测站的测量值是 $14.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 二者差别为 $4.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

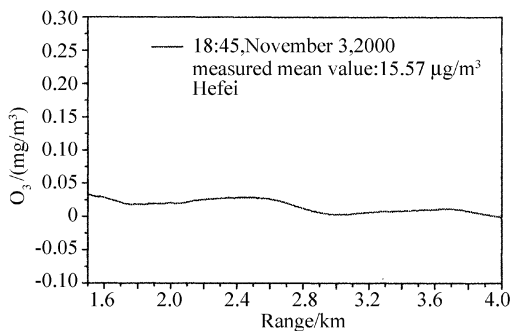


Fig. 9 O₃ horizontal profile measured by the mobile lidar system

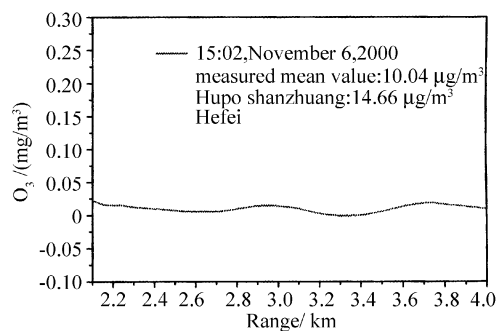


Fig. 10 O₃ horizontal profile measured by the mobile lidar system

m³, 即探测精密度达到 10 μg/m³ 的设计要求。

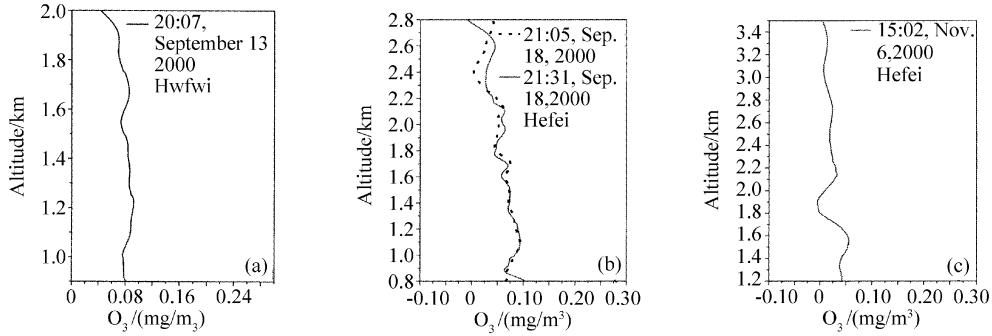


Fig. 11 O₃ concentration vertical profiles measured by the mobile lidar system

3.5 NO₂ 探测

NO₂ 探测所选用的波长分别是 398.3 nm (on) 和 397.0 nm (off), 其相应的差分吸收截面为 $1.22 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$. 图 12, 图 13 是探测得到的 NO₂ 水平分布数据, 图 14 是 NO₂ 垂直分布数据, 除图 14 (c) 中数据为晚上测量外、其它都为白天测量。从图中能看到探测距离都能达到 4 km。图 12 中数据水平分布较为均匀, 是因为该时风较大, 大气水平混合

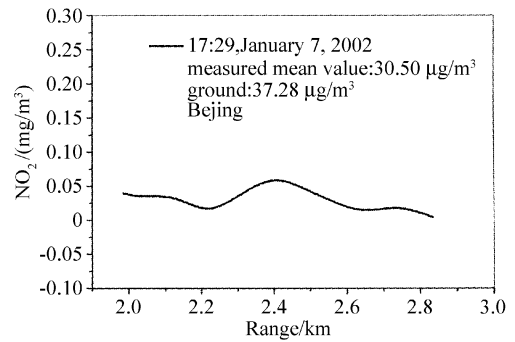


Fig. 13 NO₂ horizontal profile measured by the mobile lidar system

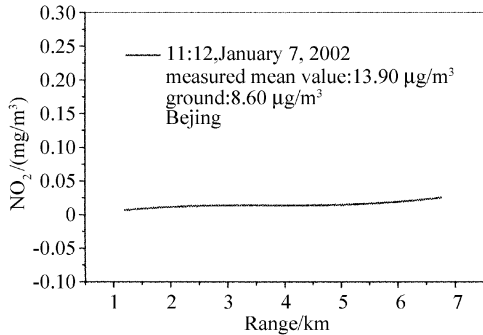


Fig. 12 NO₂ orizontal profile measured by the mobile lidar system

较好。对于水平测量、我们计算了测量范围内 NO₂ 浓度的平均值, 该值与地面 NO₂ 监测点同时得到的数据十分吻合, 其差别小于 10 μg/m³, 即探测精密度达到 40 μg/m³ 的设计要求。例如如图 12 中数据平均值为 13.90 μg/m³, 地面监测数据分别为 8.60 μg/m³; 图 13 中数据平均值为 30.50 μg/m³, 地面监测数据为 37.28 μg/m³。

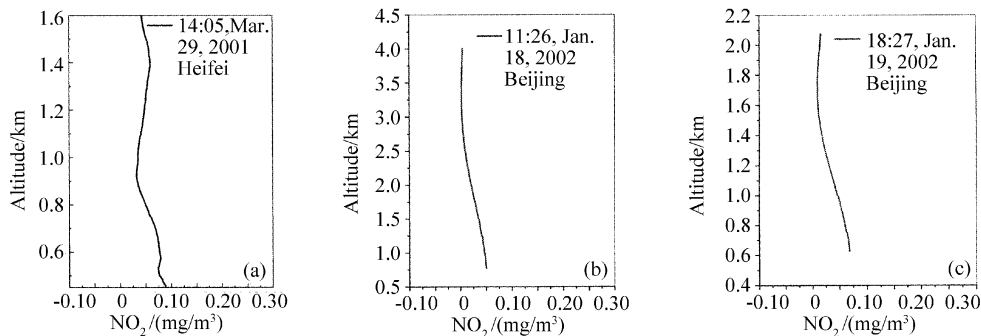


Fig. 14 NO₂ concentration vertical profiles measured by the mobile lidar system

小结 通过上述试验测量结果能得到如下几点结论: 1) 本激光雷达系统对 SO₂、NO₂ 和 O₃ 的浓度以及大气气溶胶消光系数的空间分布, 在白天和晚上

都能够进行可靠的测量, 最高距离分辨为 7.5 m; 2) 对大气气溶胶消光系数的垂直探测距离可达 10 km, 水平探测距离可达 8 km, 最小探测到的气溶

胶消光系数可达 10^{-4} km^{-1} 量级。与 L300 激光雷达对比测量表明,本激光雷达系统对大气气溶胶消光系数测量的数据可靠;3)对 SO_2 的水平及垂直探测距离都可达到 5 km。与环境监测站的测量数据比较表明,本激光雷达系统对 SO_2 测量的数据可靠;4)对 O_3 的探测距离可达 4 km。与环境监测站的测量数据对比表明,本激光雷达系统对 O_3 测量的数据可靠;5)对 NO_2 的水平及垂直探测距离都可达到 4 km。与地面定点监测数据比较表明,本激光雷达系统对 NO_2 测量的数据可靠。

参 考 文 献

- 1 Yan Fengqi, Hu Huanling, Zhou Jun. Measurements of number density distribution and imaginary part of refractive index of aerosol particles. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(7): 855~859 (in Chinese)
- 2 Zhou Bin, Liu Wenqing, Qi Feng *et al.*. Error analysis in differential optical absorption spectroscopy. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(8):957~961 (in Chinese)
- 3 Wei Heli, Wu Chengjiu, Ma Zhijun *et al.*. A new method for improving the measurement spectral resolution of atmospheric absorption spectra. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(2): 165~169 (in Chinese)
- 4 Hu H. Lidar measurements of stratospheric aerosols at Hefei, China during 1991~1997, 19th ILRC, July 6~9, 1998, Annapolis, USA
- 5 Proffitt M H, Langford A O. Ground-based differential absorption lidar system for day or night measurements of ozone throughout the free troposphere. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(12):2568~2585
- 6 Wang Z, Nakane H, Hu H *et al.*. Three-wavelength dual differential absorption lidar method for stratospheric ozone measurements in the presence of volcanic aerosols. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(6):1245~1252
- 7 Zhou Jun, Yue Guming, Jin Chuanjia *et al.*. Two-wavelength Mie lidar for monitoring of tropospheric aerosol. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(10): 412~417 (in Chinese)
- 8 Goers U B. Laser remote sensing of sulfur dioxide and ozone with the mobile differential absorption lidar ARGOS. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(11):3097~3102
- 9 Uchino O, Tabata I. Mobile lidar for simultaneous measurements of ozone, aerosols, and temperature in the stratosphere. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(15):2005~2012
- 10 National Oceanic and Atmospheric Administration, National Aeronautics and Space Administration, United States Air Force. *U. S. Standard Atmosphere*, 1976. 50~73
- 11 Elterman L. Office of Aerospace Research, United States Air Force. *UV, Visible, and IR Attenuation for Altitudes to 50 km*, 1968
- 12 Bass A M. The ultraviolet absorption cross-section of ozone. Final report to NASA, Contract No. S-40127B, 1984