

一套测量对流层臭氧的差分吸收激光雷达系统

范广强 刘建国 陈臻懿 刘文清 陆亦怀 张天舒 董云升

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要 差分吸收激光雷达是探测对流层臭氧分布的一种先进工具。研制了一套车载差分激光雷达系统, 系统基于 Nd:YAG 四倍频激光和拉曼频移技术产生紫外差分光源, 并采用卡塞格林(Cassegrain)型望远镜, 利用光栅光谱仪分离四波长的回波信号, 使用光子计数和模拟采集相融合的方式采集数据。讨论分析了系统的测量精度并与臭氧探空仪进行了对比验证实验。实验结果表明, 两台仪器测量的对流层臭氧具有很好的一致性, 证实了车载差分吸收激光雷达系统及臭氧浓度分析软件的可靠性。

关键词 遥感; 差分吸收激光雷达; 对流层臭氧; 拉曼管; 统计误差; 对比

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1113001

A Differential Absorption Lidar System for Tropospheric Ozone Monitoring

Fan Guangqiang Liu Jianguo Chen Zhenyi Liu Wenqing
Lu Yihuai Zhang Tianshu Dong Yunsheng

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

Abstract The differential absorption lidar is an advanced instrument for monitoring atmospheric ozone concentration profile. A new vehicle differential absorption lidar is developed. The lidar system emits four wavelengths ultraviolet laser based on a frequency quadrupled Nd:YAG laser and Raman shifting technique. A Cassegrain telescope is used and the grating spectrometer is used to separate the backscatter signals of the four emitted wavelengths. The data is collected by photon counting and analog acquisition integration mode. The accuracy of measurement system is discussed and analyzed. The lidar system and ozonesonde under took experiments at the same time. Experimental results show that tropospheric ozone profiles derived from lidar and ozonesonde are in good agreement, suggesting that the vehicle differential absorption lidar system and ozone concentration analysis software are reliable.

Key words remote sensing; differential absorption lidar; tropospheric ozone; Raman cell; statistical error; comparison

OCIS codes 280.1100; 280.1120; 290.1090; 290.2200; 280.3640;

1 引言

随着我国经济的快速发展, 城市群区域大气复合污染状况愈加严峻, 光化学烟雾污染和高浓度的臭氧污染^[1,2]频繁出现在北京地区、珠江三角洲及长江三角洲。大气臭氧浓度成为了光化学烟雾污染

的重要表征物。世界卫生组织和美国、日本等国家已把臭氧浓度的水平作为判断大气环境质量的标准之一, 并据此发布光化学烟雾的警报, 可见对大气臭氧浓度的时空监测也势在必行。

目前, 我国还没有全国各城市大气臭氧的时空

收稿日期: 2012-05-20; **收到修改稿日期**: 2012-07-01

基金项目: 国家 863 计划(2009AA06A311)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120024)和合肥物质研究院青年人才基金(Y03RC11122)资助课题。

作者简介: 范广强(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: gqfan@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘建国(1968—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事环境污染光学监测新技术、目标散射特性及遥感监测技术等方面的研究。E-mail: jgliu@aiofm.ac.cn

监测数据,缺乏支撑控制和治理城市群大气光化学烟雾的有效监测数据基础。光化学烟雾是多来源、多相态、多因素的,在光化学烟雾对大气污染和人体危害的研究中,不仅需要地面实时在线监测大气臭氧浓度,更需要大气臭氧浓度的时空分布特征。国家急需发展自主产权的大气复合污染中大气臭氧特性和时空分布的快速在线监测技术和系统,为我国开展光化学烟雾和细粒子生成机理研究提供数据基础,也为我国城市群大气复合污染中的颗粒物和光化学烟雾污染防治提供技术保障。

差分吸收激光雷达基于气体差分吸收的原理,通过选取两束不同波长的激光,这两个波长分别选在待测气体的强吸收截面和弱吸收截面上,利用待测吸收气体对两个激光波长的吸收差别确定两个脉冲激光共同路径上待测气体的浓度。差分吸收激光雷达具有高时空分辨率、测量精度高、实时在线、连续测量等特点,可以提供臭氧浓度的时空特征分布,成为测量大气臭氧浓度的重要手段^[3~5]。Nakazato等^[4]采用 266 nm 激光抽运 CO₂ 拉曼管产生 276、287、299 nm 3 个差分波长,使用 3 个差分波长对对流层臭氧激光雷达进行探测,胡欢陵等^[6]进行了 L625 差分激光雷达探测平流层臭氧的研制工作。近年来,中国科学院安徽光学精密机械研究所开展了对流层差分吸收激光雷达的研制和开发工作^[7],本文主要介绍了最新研制的一套测量对流层臭氧的差分吸收激光雷达。

2 差分吸收激光雷达方程

对流层臭氧浓度的测量采用的是差分吸收激光雷达技术,通过选取两个波长非常近的两束激光,其中一束位于臭氧吸收较强的位置,计为 λ_{on} ,而另一束位于吸收很弱或无吸收的位置,计为 λ_{off} 。利用大气臭氧气体对两个激光波长的吸收差别确定两个脉冲激光共同路径上大气臭氧的浓度。

差分吸收激光雷达方程可表示为^[8,9]

$$P(\lambda_i, z) = C_i \frac{\beta(\lambda_i, z)}{z^2} \times \exp\left\{-2 \int_0^z [\alpha(\lambda_i, z) + N(z)\delta(\lambda_i, z)] dz\right\},$$

$$i = on, off \quad (1)$$

式中 $P(\lambda_i, z)$ 为距离 z 处波长 λ_i 的大气后向散射回波信号, C_i 为雷达常数, $\beta(\lambda_i, z)$ 为大气后向散射系数, $\alpha(\lambda_i, z)$ 为除臭氧外的大气消光系数, $N(z)$ 为距

离 z 处待测的臭氧浓度, $\delta(\lambda_i, z)$ 为波长 λ_i 的臭氧吸收截面。

由这两个波长的激光雷达回波方程可以推知臭氧浓度的表达式^[10~12]为

$$N(z) = \frac{1}{2\Delta\delta} \frac{d}{dz} \left[-\ln \frac{P(\lambda_{on}, z)}{P(\lambda_{off}, z)} \right] + B - E_a - E_m - E_{gas}, \quad (2)$$

式中

$$B = \frac{1}{2\Delta\delta} \frac{d}{dz} \left[\ln \frac{\beta(\lambda_{on}, z)}{\beta(\lambda_{off}, z)} \right], \quad (3)$$

$$E_a = \frac{1}{\Delta\delta} [\alpha_a(\lambda_{on}, z) - \alpha_a(\lambda_{off}, z)], \quad (4)$$

$$E_m = \frac{1}{\Delta\delta} [\alpha_m(\lambda_{on}, z) - \alpha_m(\lambda_{off}, z)], \quad (5)$$

$$E_{gas} = \frac{\Delta\delta_{gas} N'_{gas}}{\Delta\delta}, \quad (6)$$

式中 $\Delta\delta$ 、 $\Delta\delta_{gas}$ 分别为臭氧及其他气体的吸收截面差, N'_{gas} 为其他吸收气体浓度, B 、 E_a 、 E_m 分别为大气后向散射、气溶胶消光和分子消光作用带来的影响, E_{gas} 为其他气体的吸收带来的影响。当 $\lambda_{on} \approx \lambda_{off}$ 时,如果 B 、 E_a 、 E_m 和 E_{gas} 都可忽略,则待测的臭氧浓度值可由两个探测波长的回波强度得到。如果无法忽略,则需要进行订正。因此,波长的选择应使吸收截面差尽可能大,同时使两波长相差尽可能小,以减小其他污染物引起的影响。

3 差分吸收激光雷达系统

考虑到市场上激光雷达各单元器件产品的技术参数、光学和机械工程技术上的可实现性,以及实现对流层臭氧浓度廓线及其时空变化的测量目的,差分吸收激光雷达系统设计主要指标如下:测量高度为 0.8~6.0 km,空间分辨率为 30~600 m,能够在白天进行测量。

差分吸收激光雷达系统为车载式激光雷达系统,方便野外实验,并且做到了电子元器件的三防(防尘、防湿、防电磁)。激光器电源所需的强电与信号探测采集单元所需的弱电分开,消除了两者之间的相互干扰。图 1 所示为结构框图,表 1 为系统的主要技术参数。系统设计总体上分为三大部分:第一部分为激光发射单元,主要器件为激光器和拉曼管;第二部分为光学接收单元,主要器件为接收望远镜、光栅光谱仪以及光电倍增管;第三部分主要为信号采集与数据处理单元。

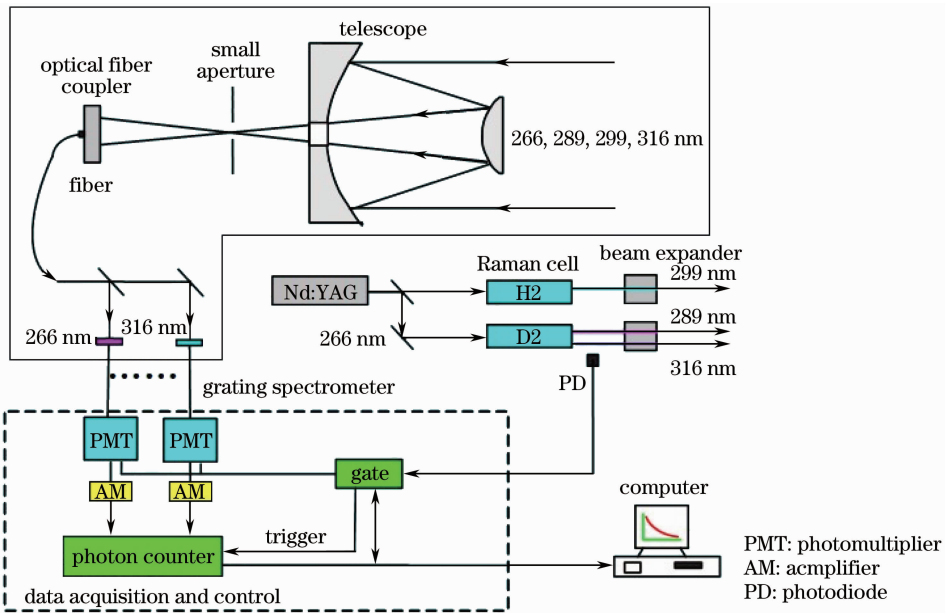


图 1 差分吸收激光雷达结构框图

Fig. 1 Schematic of differential absorption lidar

表 1 差分激光雷达系统主要参数

Table 1 Key parameters of the differential absorption lidar system

Cell name	Parameters
Transmitter laser	Nd:YAG(266 nm)
Raman active gasses	D ₂ 、H ₂
Shifted wavelength /nm	289,316,299
Output energy /mJ	10,9,13
Receiver telescope	Cassegrain
Telescope diameter	400 mm
Detector	PMT(Hamamatsu R7400)
Data acquisition	AD and photon counter

3.1 激光发射单元

激光发射单元由发射光源和发射光路两部分组成。激光器所发射的脉冲激光能量和脉冲重复频率能满足探测的需求,输出稳定,并能持续较长时间的工作。激光波长根据测量需求进行选取;能量的大小与测量的有效范围和信噪比有关;激光器的高重复频率可以改善激光雷达探测的时空分布特征;光束发散角应选择尽可能保证激光束有效传输的角度;根据测量需求,选用了光谱物理公司 Nd:YAG 266 nm 激光为激发光源。

为了得到 289、299、316 nm 三个激光发射波长,采用了长度为 1 m 的 D₂、H₂ 拉曼管,管内分别充满高纯度的 D₂ 和 H₂。266 nm 激光抽运 D₂ 拉曼管,分别由一级斯托克斯,二级斯托克斯,产生 289、316 nm 波长激光。266 nm 激光抽运 H₂ 拉曼管由一级斯托克斯产生 299 nm 波长激光。289、299、

316 nm 波长激光能量分别能达到 10、13、9 mJ,发射激光束经扩束镜扩束后发散角小于 0.3 mrad。

图 2 为发射系统结构图。Nd:YAG 激光器,266 nm 高反和半反镜片,H₂ 拉曼管,D₂ 拉曼管等发射装置被固定在光学平台上,保证了发射光路的稳定性和紧凑性。266 nm 高反镜片采用的是反射率达到 99% 的镜片,高透 532 nm 激光束。266 nm 半反半透镜片是反射率为 60% 的镜片,透过 H₂ 拉曼管、D₂ 拉曼管的能量比为 3:2,这样得到的 289 nm,299 nm 激光束在相同高度上都能保证足够的信噪比。266 nm 激光束经 H₂ 拉曼管、D₂ 拉曼管分别抽运出 299、289、316 nm 波长激光,分别由两路分光棱镜垂直发射,经透镜发射到大气中。光路中棱镜后面的透镜和拉曼管前端的透镜组成扩束系统,由于棱镜后面的透镜前后位置可调,扩束系统

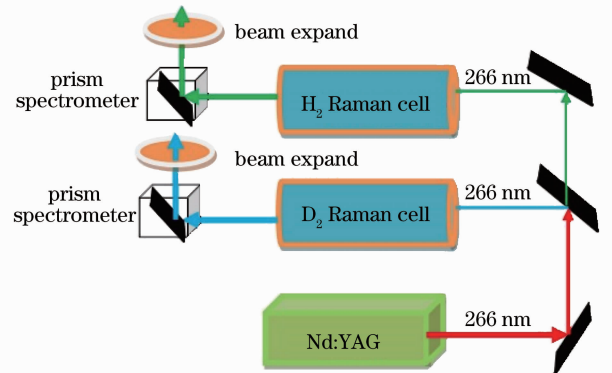


图 2 发射系统结构图

Fig. 2 Schematic of emitting system

的放大倍数可由 3 变化到 4, 激光发散角也随之改变。

由于系统采用的是离轴发射方式, 为了最大限度地减小盲区, 在光学发射与光学接收系统之间, 尽可能地减小发射光轴与接收光轴之间的距离。图 3 为臭氧激光雷达光学发射与接收系统光轴布局图。在差分激光雷达算法中, 两光路几何因子的比值对探测结果影响很大, 在设计中考虑两路光几何因子的一致性, D_2 拉曼管、 H_2 拉曼管两路光设计为对称分布在接收光学光轴的两侧, 并具有相同的重叠修正系数。

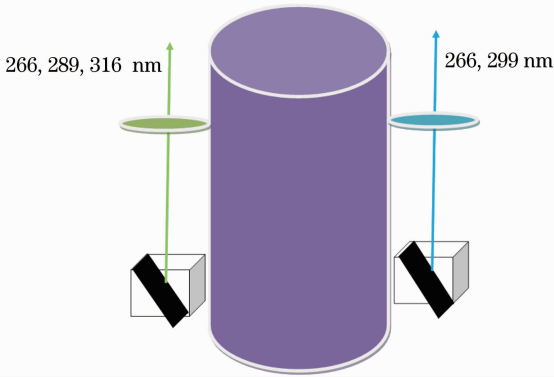


图 3 光学发射与接收系统光轴布局

Fig. 3 Optical axis layout of emitting and receiving system

3.2 接收光学单元

发射到大气中 266、289、299、316 nm 激光与空气分子发生瑞利散射, 与大气气溶胶粒子发生 Mie 散射, 与吸收气体发生吸收效应, 其后向散射光(波长分别为 266、289、299、316 nm)全部被望远镜接收。接收的后向散射光依次通过望远镜, 经小孔光阑被光栅分离出四个波长的回波信号进入探测通道, 由光电倍增管(PMT)接收并转化为电流信号。

光学接收系统由光学接收望远镜、光栅分色系统组成。光学接收望远镜系统常用的有卡塞格林型(Cassegrain)及牛顿反射式望远镜。卡塞格林型望远镜系统结构和体积比较紧凑; 而牛顿反射式结构和调整比较简单。反射式系统的优点是像差较小, 直径可以做得很大等。显然, 望远镜的口径愈大, 收集到的大气后向散射光愈多, 这样有利于提高信噪比; 因此, 需要根据特定的探测目的选择合适的望远镜口径及接收视场角。通常对光学接收望远镜的主、副镜镀上高反射率膜层以提高接收望远镜的反射率。根据测量要求, 选用体积与结构紧凑的卡塞格林型接收望远镜系统, 直径为 400 mm。望远镜

系统安装了防震系统, 并消除了温差带来的光路偏差问题。

光栅光谱仪分色系统位于光学接收望远镜的后面, 由高光谱分辨率的光栅、高效率的光学反射镜、多路光电倍增管等组成。使用滤光片提取激光回波信号是目前大多数激光雷达采用的技术手段, 但是滤光片特性受湿度、温度影响较大, 带通中心波长会产生漂移、长期稳定性差, 并且大多数滤光片的带外抑制能力不够, 宽带的背景噪声对微弱信号检测影响很大。因此采用光栅光谱仪作为分光器件, 不仅能够从原理上克服滤光片的一系列缺点, 还可以提高后继光学系统的灵敏度、信噪比和长期稳定性。高光谱光栅光谱仪选择性好, 特别适合多波长、多通道信号检测。图 4 为光栅光谱仪分色系统, 其中关键器件是高光谱分辨率紫外反射光栅, 光学效率达 30% 以上。光电倍增管采用日本滨松生产的 R7400-02 Mini PMT (266、289、299 nm) 和 R7400-03 Mini PMT (316 nm)。

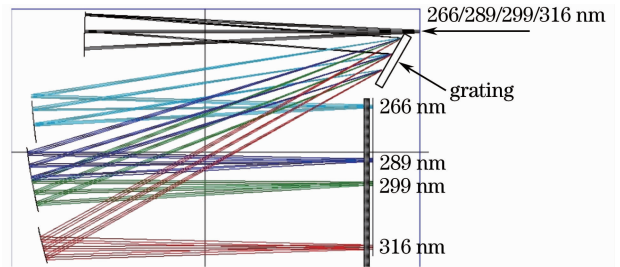


图 4 四波长光栅光谱仪的光路轨迹

Fig. 4 Grating spectrometer with four wavelength ray tracing

3.3 信号采集与数据处理单元

差分激光雷达信号非常弱, 并且动态范围可达 4 个数量级, 单独采用模数转换(AD)采集或光子计数采集信号均不能满足探测要求。因此, 采用了高速 AD 采集系统和光子计数相融合的探测手段。选用的 AD 采集卡为 12 bit, 采样频率为 40 MHz; 光子计数的最大计数率为 250 MHz。为减小探测器的输入噪声, 选取了高精密度电源和低噪声的探测器, 并设计了探测器的高压分压电路。

图 5 为采集程序控制流程图。使用 Labview 语言编写了数据采集程序, 系统开启后, 系统能够首先完成初始化, 对控制软件参数、采集软件与采集系统之间通信是否正常、激光器是否正常工作进行判断, 然后进行采集/暂停的工作循环。首先, 采集器根据设定参数开启光子通道和模拟信号通道进行采集, 控制软件不断获取采集到数据进行存储, 以备后期

处理。数据采集程序完成数据采集和存储,并显示初步结果。

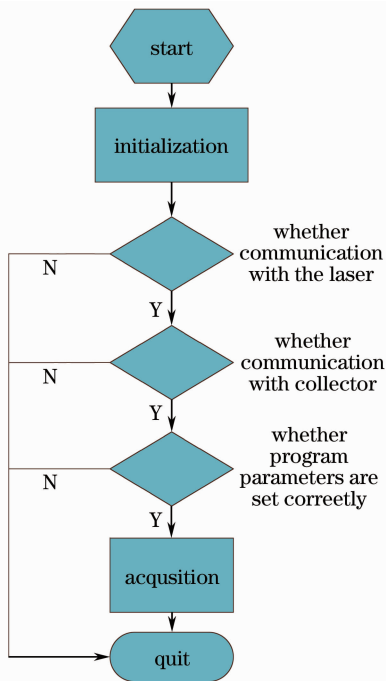


图5 采集程序控制流程图

Fig. 5 Computer program control system in a detail way

数据处理程序采用 Visual C++ 程序语言编写,数据处理程序根据采集到的双波长回波信号,利用差分吸收激光雷达方程可得到待测气体浓度。在数据处理过程中,考虑气溶胶和其他气体分子对待测气体浓度的影响,分别对气溶胶和其他吸收气体对待测气体浓度的影响进行订正。

4 测量精度和对比验证

差分吸收激光雷达测量臭氧浓度的精度取决于很多因素,可归结为两大类。第一类为统计误差,取决于信号和背景噪声的抖动。光电倍增管接收的光子数的分布符合泊松分布模型,可以通过滤波技术如三角滤波、经验模态分解法(EMD)滤波、小波滤波等多种滤波方法滤除信号和背景噪声,减少统计误差。也可以通过增加累计时间的方法增加信号信噪比,减少统计误差。第二类为系统误差,由大气散射和吸收特性对波长的依赖性所决定。大气分子的消光特性随波长的依赖性可以由美国标准大气模型通过(5)式来修正。差分吸收激光雷达系统采集的 316 nm 波长信号通过 Fernald 方法反演得到大气气溶胶的后向散射系数和消光系数,设大气气溶胶的后向散射系数和消光系数波长依赖关系为 λ^{-1} ,其中 λ 为波长。利用(3)式和(4)式分别对大气气溶

胶后向散射系数和消光系数修正。

车载差分吸收激光雷达系统安排在长春市绿园区气象局,在 2011 年 6 月展开实验。差分吸收激光雷达系统采集的原始信号空间分辨率为 7.5 m,每 2000 发脉冲积累一次采集,这样 1 h 能够采集 18 组原始信号。使用 2011 年 6 月 24 日 1 h 采集的原始信号,分析不同差分距离对流层臭氧浓度及其统计误差。臭氧浓度统计误差通过 1 h 的臭氧浓度标准方差与臭氧浓度平均值的比值计算得到。不同的差分距离即采用不同的空间分辨率,若使用 100 m 的差分距离,即将 100 m 内的原始信号累加平均,得到 100 m 空间分辨率下的信号。使用该信号由(2)式差分计算得到臭氧浓度。图 6 为使用不同差分距离反演的对流层臭氧浓度及其统计误差。1.5 km 以下,统计误差随高度增加而递减,主要有两方面原因。一是由气溶胶修正误差引起的。在大气修正过程中,将气溶胶雷达比、气溶胶消光波长指数等参数设为常数,但是在实际大气中,气溶胶雷达比、气溶胶消光波长指数在大气中是变化的,这种变化在大气修正中给反演结果引入了反演误差。二是由于实际大气中,臭氧浓度在 1 h 内是变化的。1 h 内的臭氧浓度标准偏差包含了臭氧浓度的变化。这两种因素造成的臭氧浓度的变化都是随高度递减的。1.5 km 以上,臭氧浓度的统计误差随高度升高而递增。差分距离为 100 m,统计误差在 10% 时对应的高度为 3382 m,6500 m 高度处的统计误差上升至 68%。增大差分距离可以减小反演结果的统计误差,在差分距离为 300 m 时,6500 m 高度处的统计误差减小至 10%。在统计误差小于 10% 时,通过增大差分距离,减小统计误差的效果并不明显,进一步

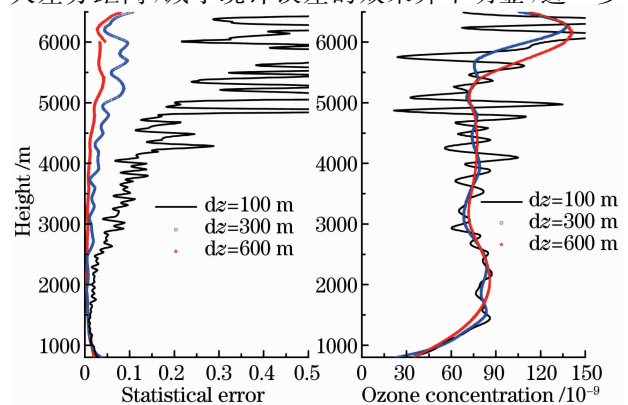


图6 差分激光雷达使用不同差分距离反演的对流层臭氧浓度及其统计误差

Fig. 6 Tropospheric ozone concentration and statistical error at different d_z for differential absorption lidar

增大差分距离至 600 m, 6500 m 高度处的统计误差为 8%。为了兼顾反演结果的统计误差和精细结构的变化, 结合反演结果的统计误差大小, 在不同高度采用不同的差分距离的方法对原始信号进行处理。以反演结果统计误差为 10% 为可允许的最大统计误差, 则在 3382 m 以下高度, 采用差分距离为 100 m, 在此高度以上, 采用 300 m 的差分距离。

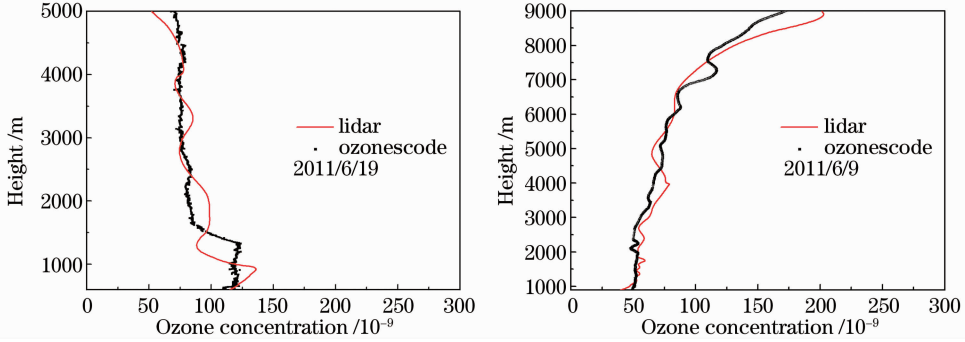


图 7 臭氧激光雷达与臭氧探空仪对比结果

Fig. 7 Comparison of ozone concentration derived from lidar and ozonesonde

差分吸收激光雷达系统可以测量对流层臭氧的时空分布特征, 图 8 显示了 2011 年 6 月 20 日 16 h 的对流层臭氧的时空分布。由图可知, 1000 m 以下对流层臭氧浓度昼夜变化明显, 夜间臭氧体积分数在 30×10^{-9} 左右, 中午 12 h 后对流层臭氧浓度大幅度增加, 至下午时刻体积分数达到了 120×10^{-9} 以上。1000 m 以上高度臭氧浓度昼夜变化不明显, 但存在一些精细变化结构。夜间, 在 1000~2000 m 高度, 存在浓度偏高的臭氧气团, 臭氧体积分数为 $60 \times 10^{-9} \sim 80 \times 10^{-9}$ 。

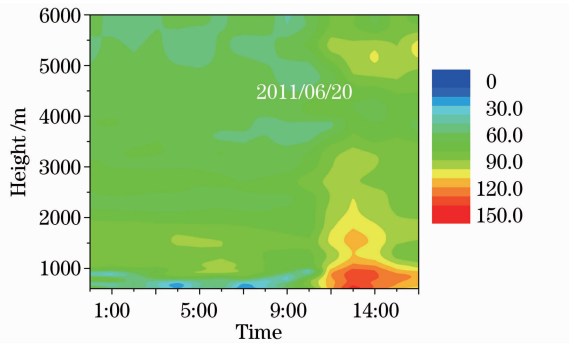


图 8 臭氧浓度时空分布特征

Fig. 8 Spatial and temporal distribution characteristics of ozone concentration

5 结 论

根据大气臭氧光谱差分吸收的原理研制出了高灵敏、高精度、实用可靠的大气臭氧污染监测的车载差分激光雷达系统。在长春气象局与探空气球开展

与此同时, 利用中国科学院大气物理研究所研制的臭氧探空仪开展了大气臭氧的探空实验。图 7 为差分吸收激光雷达与臭氧探空仪探测臭氧的对比结果。由 2011 年 6 月 9 日, 2011 年 6 月 19 日两天的对比结果可知, 两台仪器测量的大气臭氧浓度廓线具有很好的一致性, 对比结果反映了车载差分激光雷达系统探测对流层臭氧的可靠性。

了对比验证实验, 实验结果证实了系统和分析软件的可靠性。

参 考 文 献

- 1 Shi Yuzhen, Wang Gengchen, Xu Yongfu. Simulation study of photochemical smog in Beijing urban and suburban areas[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2008, **13**(1): 84~92
- 2 石玉珍, 王庚辰, 徐永福. 北京市城近郊区光化学烟雾模拟研究[J]. *气候与环境研究*, 2008, **13**(1): 85~92
- 3 Li Jie, Wu Qizhong, Gao Chao *et al.*. Model study of ozone in the boundary layer over East Asia in Spring[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(1): 1~6
- 4 李杰, 吴其重, 高超等. 东亚春季边界层臭氧的数值模拟研究[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(1): 1~6
- 5 G. Ancellet, A. Papayannis, J. Pelon *et al.*. DIAL tropospheric ozone measurement using a Nd: YAG laser and the Raman shifting technique[J]. *Atmospheric and Oceanic Technology*, 1989, **6**(5): 832~839
- 6 M. Nakazato, T. Nagai, T. Sakai *et al.*. Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(12): 2269~2279
- 7 A. Papayannis, G. Ancellet, J. Pelon *et al.*. Multi-wavelength lidar for ozone measurements in the troposphere and the lower stratosphere[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**: 467~476
- 8 Hu Huanling, Wang Zhien, Wu Yonghua *et al.*. UV-DIAL system for measurements of stratospheric ozone[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, **22**(5): 701~708
- 9 胡欢陵, 王志恩, 吴永华等. 紫外差分吸收激光雷达测量平流层臭氧[J]. *大气科学*, 1998, **22**(5): 701~708
- 10 Hu Shunxing, Hu Huanling, Zhou Jun *et al.*. Dual-DIAL: a pair of wavelengths for high precise measurements of ozone[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **16**(2): 242~252
- 11 Fan Guangqiang, Liu Jianguo, Zhang Tianshu *et al.*. Dual-channel polarization lidar monitoring of sandstorm and its transportation research[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s114006
- 12 范广强, 刘建国, 张天舒等. 双通道偏振激光雷达监测沙尘暴污

- 染及其输送研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(s1): s114006
- 9 Liu Qiaojun, Zheng Yucheng, Zhu Jianhua *et al.*. Ultraviolet Mie lidar observations of aerosol extinction in a dust storm case over Macao [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(3): 626~629
- 刘巧军, 郑玉臣, 朱建华等. 利用紫外 Mie 散射激光雷达探测澳门地区沙尘暴事件[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, **32**(3): 626~629
- 10 M. H. Proffitt, A. O. Langford. Ground-based differential absorption lidar system for day or night measurements of ozone throughout the free troposphere [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**: 2568~2585
- 11 Hu Shunxing, Hu Huanling, Zhang Yinchao *et al.*. Different absorption lidar for environmental SO₂ measurements[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9): 1121~1126
- 胡顺星, 胡欢陵, 张寅超等. 差分吸收激光雷达测量环境 SO₂ [J]. 中国激光, 2004, **31**(9): 1121~1126
- 12 Tao Zongming, Chen Yu, Chu Delin *et al.*. Atmospheric backscattering correction for ozone measurement with AML-2 mobile lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, **3**(6): 401~406
- 陶宗明, 陈宇, 褚德林等. AML-2 车载激光雷达测量臭氧的大气后向散射系数项修正方法研究[J]. 大气与环境光学学报, 2008, **3**(6): 401~406

栏目编辑: 宋梅梅