

doi: 10.3788/gzxb20174607.0701004

车载二氧化硫差分吸收激光雷达系统

陈亚峰^{1,2}, 王晓宾^{1,2}, 刘秋武^{1,2}, 曹开法¹, 胡顺星¹, 黄见¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学, 合肥 230026)

摘 要:研制了一套探测低层大气二氧化硫的车载可移动激光雷达系统. 该系统选用的差分波长对为 300.05 nm 和 301.50 nm. 光源采用两台 Nd:YAG 激光器分别泵浦两台窄线宽染料激光器经过倍频来获得. 激光经过合束、扩束后与望远镜同轴发射. 后向散射信号被近牛顿式望远镜接收后, 通过光电倍增管转换为电信号, 然后被数据采集卡采集, 最后用来反演二氧化硫分布廓线. 在淮南地区进行了针对近地面水平探测的外场实验, 结果表明, 在 0.8~3.0 km 范围内, 当晚二氧化硫浓度在 $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上下波动, 气象部门地面仪器结果为 $18\sim 22 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 实验结果与仪器结果具有可比性.

关键词:大气光学; 差分吸收激光雷达; 光学遥感; 二氧化硫; 吸收截面

中图分类号: P412.291

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)07-0701004-7

Mobile SO₂ Differential Absorption Lidar System

CHEN Ya-feng^{1,2}, WANG Xiao-bin^{1,2}, LIU Qiu-wu^{1,2}, CAO Kai-fa¹, HU Shun-xing¹, HUANG Jian¹

(1 Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: A mobile lidar system was developed which can be used to measure the lower layer atmospheric SO₂. The lasers with wavelength of 300.05 nm and 301.50 nm are adopted in this system. The laser beams, produced by two narrow linewidth dye lasers pumped by two Nd:YAG lasers, are frequency doubled by second harmonic generation crystals. They are merged, expanded and transmitted into the atmosphere coaxially with telescope. The back scattering signals are received by the Newton telescope and converted into electrical signals by photomultiplier. The data are obtained by A/D acquisition card and used to estimate the profile of sulfur dioxide. The horizontal detection were field experimented in Huainan, the results show that the mean concentration of atmospheric SO₂ is about $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in the range from 0.8 km to 3.0 km. It conforms with the results of ground instrument from meteorological department whose results is about $18\sim 22 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Key words: Atmospheric optics; Differential absorption lidar; Optical remote sensing; SO₂; Absorption cross section

OCIS Codes: 010.1290; 010.3640; 280.1910

0 引言

二氧化硫(SO₂)是一种无色、有刺激性气味的大气痕量气体,是大气中最常见、最主要的污染物之一,参与酸雨、灰霾和光化学烟雾的形成,对环境危害比较大. 人体吸入大量 SO₂后会对呼吸器官造成损伤,可导致

基金项目:国家重大科研仪器设备研制专项(No. 41127901)、国家自然科学基金 (Nos. 41575032, 41505019)资助

第一作者:陈亚峰(1989-),男,博士研究生,主要研究方向为差分吸收激光雷达系统以及光机设计. Email:cyfustc@mail.ustc.edu.cn

导师(通讯作者):胡顺星(1966-),男,研究员,博士,主要研究方向为各种激光雷达大气探测方法和技术. Email:sxhu@aiofm.ac.cn

收稿日期:2017-02-23;录用日期:2017-04-20

<http://www.photon.ac.cn>

支气管炎、肺炎,严重者可致肺水肿和呼吸麻痹^[1]. 二氧化硫的主要来源是人类排放,即矿物质和化石燃料的燃烧;自然界对二氧化硫的来源也有一定的贡献,其中包括火山爆发直接排放以及自然界有机物腐烂释放^[2]. 因此,对二氧化硫浓度和空间分布进行有效的探测十分必要.

测量大气中二氧化硫的方法主要有分光光度法、碘量法、紫外荧光法、激光雷达探测、卫星遥感、定电位电解法以及植物监测法等^[3]. 与传统的取样和接触式测量相比,激光雷达探测大气污染可以连续、实时、快速地遥感监测,探测结果具有很高的时间和空间分辨率,可以方便获得污染物分布状况,是比较理想的探测手段^[4]. 差分吸收激光雷达(Differential Absorption Lidar, DIAL)以被测物质对某一光谱线的峰值吸收和峰谷吸收的差分原理为基础,具有较高探测灵敏度,最早由美国科学家 Schotland^[5]提出,被用于探测大气中的水汽含量. 随后这种技术被广泛应用于探测大气中臭氧、二氧化硫、二氧化氮等痕量气体. 德国 Fredriksson^[6]等报道了测量大气二氧化硫的车载激光雷达系统,该系统采用波长对 299.30 和 300.05 nm 来进行实验. 安徽光机所^[7]也曾经研制了一台利用拉曼光源测量大气二氧化硫的激光雷达,该系统采用 Nd:YAG 四倍频激光分别抽运氩气和甲烷产生一级斯托克斯拉曼频移,从而产生波长为 289.04 nm 和 288.38 nm 的激光,对应二氧化硫的强吸收和弱吸收波长来进行差分吸收探测.

本文介绍的二氧化硫差分吸收激光雷达系统是中国科学院大气物理研究所多波段多大气成分主动综合探测系统 (Atmospheric Profiling Synthetic Observation System, APSOS) 的子系统之一. 差分吸收激光雷达使用两台窄线宽染料激光器来进行差分探测,易于操作、波长精度高、能量输出稳定.

1 差分吸收激光雷达探测原理及波长选择

差分吸收激光雷达主要利用待测气体的光谱吸收特性来测量该气体的含量,从而可以计算出气体浓度. 一般采用两个波长来进行差分探测^[8],其常见技术手段是向大气中发射两束波长接近,脉宽很窄的激光脉冲,其中一个波长位于待测气体分子的吸收峰,该波长记为 λ_{on} ,另一束激光的波长位于待测气体吸收峰的边翼或者吸收峰之外,该波长记为 λ_{off} . 由于待测气体对两个波长的激光吸收强弱不同,所以接收到的回波信号就会形成差异. 因为两束激光波长接近,可以认为大气后向散射、气溶胶消光和分子消光对两束光的影响基本相同,回波信号的差异主要是由于待测气体的吸收造成的. 将两种波长回波信号强度进行反演计算,即可确定在测量路径上不同探测距离处待测气体的浓度.

结合双波长差分吸收激光雷达的探测方法,通过单次弹性散射激光雷达方程可以推导出,在距离 z 处待测气体分子在光束传播路径上的平均数密度 $N(z)$ 可表示为^[9-11]

$$N(z) = \frac{1}{2[\sigma(\lambda_{on}, T) - \sigma(\lambda_{off}, T)]} \left\{ \frac{d}{dz} \left[-\ln \frac{P(\lambda_{on}, z)}{P(\lambda_{off}, z)} \right] + B_a + E_a + E_m \right\} \quad (1)$$

式中, $\sigma(\lambda_{on}, T)$ 、 $\sigma(\lambda_{off}, T)$ 分别为温度为 T 时待测气体分子在波长 λ_{on} 、 λ_{off} 处的吸收截面, $P(\lambda_{on}, z)$ 、 $P(\lambda_{off}, z)$ 分别为对应波长在高度 z 处的激光雷达信号, B_a 、 E_a 、 E_m 分别为大气后向散射、大气气溶胶消光、大气分子消光引起的修正项.

因为在差分吸收激光雷达系统中, λ_{on} 和 λ_{off} 相差很小,所以 B_a 、 E_a 及 E_m 可以忽略不计,式(1)可简化为

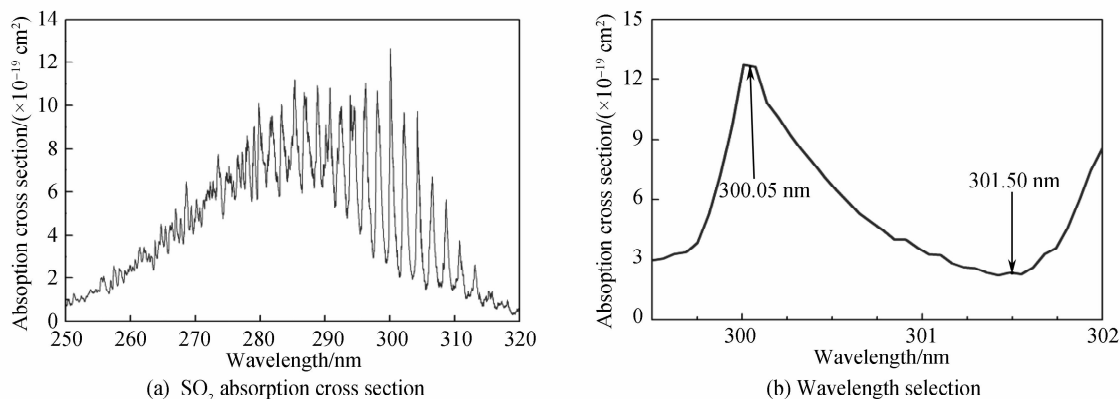
$$N(z) = -\frac{1}{2[\sigma(\lambda_{on}, T) - \sigma(\lambda_{off}, T)]} \frac{d}{dz} \left[\ln \frac{P(\lambda_{on}, z)}{P(\lambda_{off}, z)} \right] \quad (2)$$

实际上由于激光雷达信号是离散的,在反演待测气体浓度时,常取差分距离 Δz ,计算出 z 到 $z + \Delta z$ 之间的平均值,则待测气体浓度的最终反演公式为

$$N(z) = -\frac{1}{2\Delta z[\sigma(\lambda_{on}, T) - \sigma(\lambda_{off}, T)]} \ln \frac{P(\lambda_{on}, z + \Delta z)P(\lambda_{off}, z)}{P(\lambda_{off}, z + \Delta z)P(\lambda_{on}, z)} \quad (3)$$

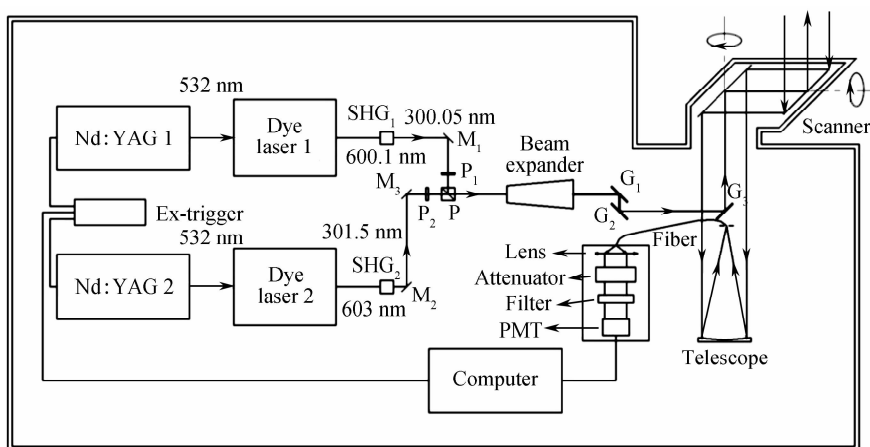
对于差分吸收激光雷达系统来说,当待测气体浓度一定时,若想获得较大的吸收效应,就需要选择大的吸收截面,另外需要兼顾光源选择和其他气体的吸收效应. 波长小于 230 nm 的紫外波段,由于氮气和氧气存在很强的吸收光谱带,致使大气在该波段几乎成为“不透明区”. 在红外波段,因具有丰富的二氧化碳和水汽吸收带,许多红外波段无法有效地用于探测污染气体浓度. 综上,波长选择考虑在紫外和可见光波段. 二氧化硫的可利用吸收波段主要位于紫外波段,图 1 为二氧化硫气体在 250.00~320.00 nm 范围内的光谱吸收截面,在此范围内存在有规则的峰谷结构. 在 300.00 nm 附近峰谷值相差较大,即吸收截面差最大,波长间

隔较小,并且在此波段其他气体的吸收效应比较小.这些气体主要包括大气中低浓度的臭氧和二氧化氮,在大气中的含量与二氧化硫相当,但吸收截面差远远小于二氧化硫,其干扰效应可以忽略不计.因此,所以选择 $\lambda_{\text{on}}=300.05\text{ nm}$ 作为强吸收线, $\lambda_{\text{off}}=301.50\text{ nm}$ 作为弱吸收线.

图1 SO_2 气体吸收截面及波长选择Fig. 1 SO_2 absorption cross section and wavelength selection

2 二氧化硫差分吸收雷达系统

根据差分吸收激光雷达的探测原理和方法,设计了一套车载雷达系统.该系统集中于方舱中,具有灵活的可移动性,能够适应外场探测的需求.雷达系统采用一体化舱体的结构布局,在方舱内集成了发射系统、接收系统与后继光路、控制系统以及数据采集处理系统.方舱内部装有两台大功率军用空调以及除湿机,可以保证适宜的温度和湿度,以确保光学仪器和电子仪器的稳定运行.系统的结构框图及布局如图2.

图2 SO_2 差分吸收激光雷达系统结构示意图Fig. 2 Schematic diagram of SO_2 DIAL system

2.1 发射系统

激光雷达的发射系统由发射光源和发射光路组成.主要部件为激光器、反射镜、倍频晶体(Second Harmonic Generation, SHG)、波片、棱镜、扩束镜以及其他光学支撑部分.发射光源由四台激光器组成,包括两台Nd:YAG激光器和两台染料激光器.

Nd:YAG激光器采用外触发模式.控制系统产生交替的10 Hz的方波来触发两台激光器的氙灯,从而产生基频为1064.00 nm的激光.该基频光通过内置的二倍频单元,产生532.00 nm的激光来泵浦染料激光器.两台染料激光器的振荡级与放大级染料均采用Rhodamine B,溶剂为无水乙醇.在532.00 nm激光泵浦下,两台染料激光器分别产生600.10 nm和603.00 nm的激光,经过倍频晶体后,获得波长为300.05 nm和301.50 nm的激光,记作 λ_{on} 和 λ_{off} ,他们分别对应二氧化硫吸收光谱的吸收峰和吸收谷.

为了尽量减少探测系统由于几何因子造成的误差,选择将两束光进行合束,与望远镜同轴发射.一般情况下,针对同波长或者波长相差不大的激光,如果采用分色片合束,会造成反射光的透射能量损失和透射光

的反射能量损失^[12-13],所以采用偏振棱镜使两束激光合成一束,使激光能量尽量被充分利用.两台染料激光器出射激光均为垂直方向的线偏振光,通过倍频晶体后经过可旋转方向的波片 P_1 、 P_2 分别转换为S波和P波(S波和P波均相对于偏振棱镜的偏振面),然后沿正交方向传输到偏振棱镜P.偏振棱镜通光表面镀有300 nm增透膜,且棱镜胶合面具有反射S波和透射P波的功能,反射效率优于98%,透射效率优于90%.这样两束激光就会合束到同一光路上.通过反复优化调节反射镜 M_1 、 M_2 、 M_3 来提高合束精度.合束后的光进入扩束镜进行12倍扩束,扩束有助于改善光束的发散角和能量分布.然后光束依次通过导向镜 G_1 、 G_2 ,到达安装在望远镜中心的 G_3 , G_3 与望远镜轴线呈 45° 夹角.导向镜和反射镜的表面镀有介质膜,对测量二氧化硫的波长高反,其余波段高透.通过优化调节 G_1 、 G_2 ,从而实现光束与望远镜同轴发射进入大气.

2.2 接收系统及后继光学系统

发射到大气中的激光光束与大气发生吸收效应,同时在传播路径上发生弹性散射,其后向散射信号被望远镜所接收.望远镜为口径为350 mm的近牛顿式,其通光面镀有高反射率膜层,焦距为800 mm,焦点处采用旋转式可调光阑,接收视场角为 $0.2\sim 2$ mrad.旋转光阑可以对后继光路的通光量进行调节,也可以抑制激光雷达的近场强回波信号,从而避免造成光电倍增管(Photomultiplier, PMT)的饱和失真.望远镜底座安装了橡胶减震,既保证了主镜安全,又可以减小震动带来的光路偏差.回波信号被望远镜接收后,进入传导光纤,到达后继光路.从光纤导出的光经过准直镜准直后变成平行光束,紧接着该平行光束穿过衰减片,经过中心波长为300.75 nm、半带宽3 nm的窄带干涉滤光片,有用的信号光最终到达光电倍增管,从而输出电信号.

2.3 信号探测与数据采集系统

由于是弱信号探测,并且探测信号为紫外波段,光电倍增管选用滨松H10426-01,该光电倍增管阴极辐射响应峰值在300~400 nm之间,工作电压为15 V,放大倍数通过调节增益电压 $0.4\sim 1.5$ V来实现.为减小探测器的输入噪声,选取了大华高精密稳压电源,并自主设计了探测器的分压电路.差分吸收激光雷达信号动态范围比较大,可达3~4个数量级^[14-15],为了准确获取高频率、高动态范围的信号,选用了PCI9826H高速A/D数据采集卡,采样率最高可达20 MS/s.该卡板载内存512 M可供数据存储,双极性输入,采集卡采用外触发模式,触发信号由控制系统提供.采集卡采集到的信号最终存储在计算机以供后续反演分析.

2.4 控制系统及扫描系统

整个系统控制软件采用LabVIEW编写,集成了Nd:YAG激光器控制、染料激光器控制、数据采集系统、扫描系统.系统时序采用自主研发的现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)电路来控制,时序示意图如图3. FPGA电路产生两路交替的10 Hz脉冲信号A和B分别用来触发两台Nd:YAG激光器,脉冲宽度为 $10\ \mu\text{s}$,且上升沿小于1 ns.交替的脉冲可以使最终被采集到的on和off信号严格错开.为了区分两个波长的信号,引入了标志位信号C.信号C与信号A同步,但存在一定的延时,它被采集卡的备用通道采集并存储,用来鉴别两个差分波长信号,方便后续信号处理和反演.信号D是从两台Nd:YAG激光器的Q SWITCH OUT输出的信号,然后经过“或”运算得到的20 Hz方波,该方波用来触发数据采集卡.

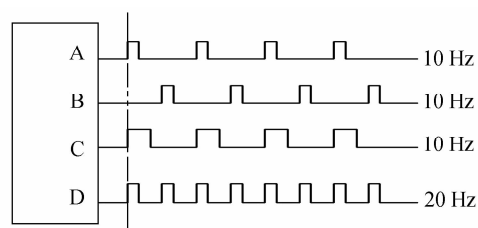


图3 控制系统时序图

Fig. 3 Sequence chart of control system

为了后期获取空间立体探测结果,系统还配置了二维扫描装置.扫描装置位于方舱前部舱顶位置,该扫描装置可以实现方位旋转和俯仰旋转,由工控机内的运动控制卡控制.两个维度的旋转采用步进电机驱动,蜗轮蜗杆传动,从而实现水平方向 180° 旋转,俯仰方向 360° 旋转,内部设有光电接触开关,可以方便实现快速回到零位.扫描头内部装有两片基底为K9玻璃的镀膜高反射镜,并且保证高度同轴.整个扫描装置具有良好的防震性能和抗温变性能,可以适应恶劣条件下的外场探测.

3 实验结果与误差分析

该差分吸收激光雷达系统位于淮南市大气科学研究院,其外观和内部布局如图4.该研究院远离市中

心,避免了城市杂散光的干扰.系统经过多次优化调试,可以稳定运行.在晴天的地面,由于白天太阳的强辐射,臭氧的浓度一般白天较高而夜晚较低^[15].为了尽量减少臭氧吸收造成的干扰和天空背景噪声,选择在夜间进行实验.



图4 SO₂差分吸收激光雷达外观与内部
Fig. 4 Appearance and interior of SO₂ DIAL system

将采集软件设定为每组数据采集1200个脉冲,用时1 min,包含600个on脉冲和600个off脉冲.每一发脉冲的数据均被采集,并以二进制的形式存放在计算机磁盘中,以供后续数据处理.二进制格式数据量比较小,存取速度快,可以减小采集卡和计算机的运行压力.采集卡选用10 MS/s,原始数据对应的空间分辨率为15 m,采样深度设为9600.该采集卡共有4个通道,选用其中两个通道,第一个通道连接光电倍增管,第二个通道采集用来区分on脉冲与off脉冲的标志位信号.

选取2016年7月7日夜間某一时段(20:23-20:32)的10组数据进行分析.为了提高信噪比,采取时间累积的方法,将这10组数据进行叠加平均,其中0~9.0 km的原始回波信号的分布如图5,从图中可以看出该系统在0~3.0 km的信号正常,信噪比较好.由于激光雷达采集到的原始回波信号数据包含了有用的后向散射信号和背景噪声,所以在数据处理之前一般需要扣除背景噪声.常用的扣除背景的方法有两种,一种是不发射激光情况下,采集纯背景噪声.但是该方法费时费力、比较麻烦,并且采集信号与采集背景噪声两个时间的大气状态不尽相同,增加了实验误差,所以一般采用第二种,即选取每组信号远端无激光回波信号或者光信号远远小于噪声的部分作为背景噪声.在本次实验中,选取了9~15 km处信号的平均值作为背景信号,然后对原始信号进行背景噪声扣除,再对数据进行平滑处理.平滑处理可以有效减弱随机噪声和大气抖动造成的干扰.利用式(3)进行计算,其中二氧化硫的吸收截面差选用Vandaele^[16]等在温度为298K条件下的测量值 $\Delta\sigma = 1.005 \times 10^{-18} \text{ cm}^2/\text{molec}$.然后对结果再次进行平滑,得到该时段的二氧化硫浓度随距离的分布如图6.

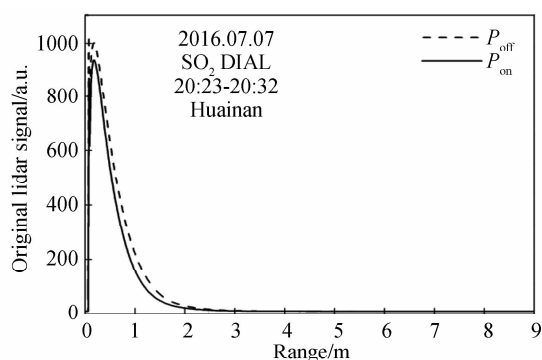


图5 原始回波信号分布
Fig. 5 Curves of original echo signal

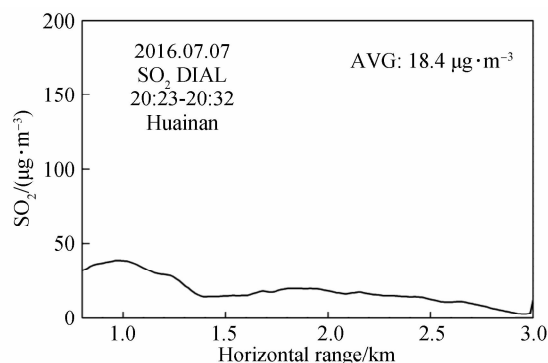


图6 SO₂差分吸收激光雷达的测量结果
Fig. 6 Measurement result of SO₂ DIAL system

在这个探测时段内,该差分吸收激光雷达系统水平探测平均浓度为 $18.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.当地气象部门公布的二氧化硫浓度为 $22 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,由此可以看出,该系统的探测结果较为准确可信.在1 km附近浓度较高,可能是因为那里存在一个居民区和公路,由于人类活动造成了二氧化硫浓度的升高.系统持续探测了2.5 h,以0.5 h数据为一组,运用同样的数据处理方法分析了这6组数据.各个时间段的分布廓线和平均浓度如图7.当晚气象状况良好,天气晴朗,微风,大气状态相对比较稳定.

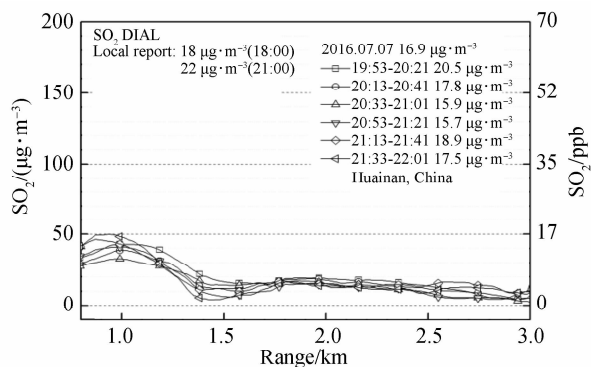


图7 不同时间段的测量结果

Fig. 7 Measurement results in different periods

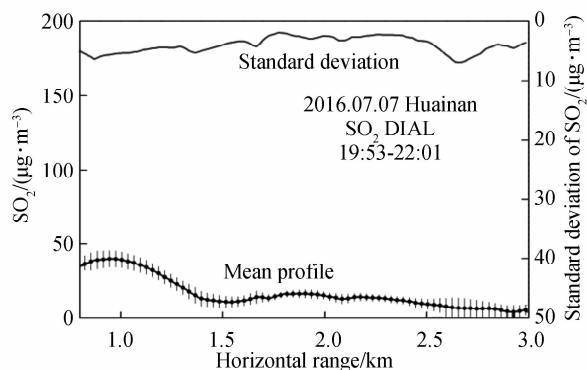
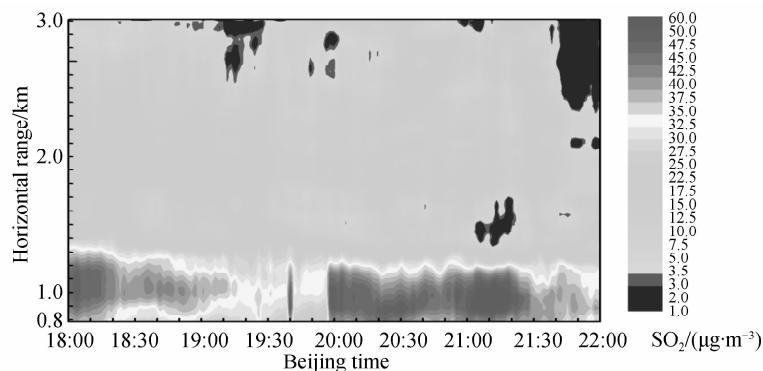


图8 测量结果的平均值与标准差

Fig. 8 Mean and standard deviation of results

从图中可知不同时间段的探测结果较为符合,在探测路径上不同时间段的平均浓度在 $15 \sim 20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内波动,当天夜间二氧化硫的空间分布相对稳定.结果表明系统运行稳定可靠,能够用于长时间探测.对测量时间段的所有数据进行整体分析,计算出其平均分布廓线和标准差,如图8.当晚测量点大气中二氧化硫在不同时间段测量标准差为 $4.17 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.从平均廓线可以直观看出测量结果在不同距离上探测结果符合较好.最后给出当晚水平方位探测结果的时空分布图,见图9,在 $0.8 \sim 3.0 \text{ km}$ 范围内,水平方向二氧化硫浓度在 $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上下波动,分布基本稳定均一.

图9 SO₂时空分布变化Fig. 9 Spatial and temporal distribution of SO₂

差分吸收激光雷达的误差来源比较多,主要包括大气抖动造成的回波信号统计误差、待测气体吸收截面不确定性误差、干扰气体吸收引起的误差.激光在大气中传输,受到大气湍流起伏的影响,会造成回波信号的随机抖动,从而引起测量误差,对此一般采用多次累加平均、权重平滑等数据处理方法来减小该误差.二氧化硫在光照下极不稳定,吸收截面受温度和压强影响,精确测量其吸收截面比较困难,该系统中采用 Vandael^[16]在 298K 条件下测得的吸收截面的系统误差为 3.8%,该因素在水平方位探测时一般可以忽略.系统采用的工作波长为 $\lambda_{\text{on}} = 300.05 \text{ nm}$ 和 $\lambda_{\text{off}} = 301.50 \text{ nm}$,该波段的干扰吸收气体主要有二氧化氮和臭氧,在淮南地区其浓度与二氧化硫基本相同,吸收截面差分别为 $\Delta\sigma_1 = -0.021 \times 10^{-19} \text{ cm}^2/\text{molec}$ 和 $\Delta\sigma_2 = 0.788 \times 10^{-19} \text{ cm}^2/\text{molec}$,考虑单一因素时,两者引起的测量误差分别为 0.21%(基本可以忽略)和 7.8%.其中臭氧引起的误差可以采用两种方法来减小:一是利用臭氧浓度数据对反演结果进行修正;二是采用三波长双差分的方法来消除误差,这个也是下一步工作的方向之一.

4 结论

基于差分吸收激光雷达的探测原理,自主研发了一台实用可靠的车载二氧化硫差分吸收激光雷达系统.详细介绍了该激光雷达的系统结构与硬件、软件组成,并且进行了外场实验.通过对探测数据的反演与分析可知,探测结果较为准确可信,水平有效探测距离可达 $0.8 \sim 3.0 \text{ km}$,反演出的二氧化硫气体浓度与气象部门地面仪器公布的数据具有可比性.在同一天夜晚进行了多次长时间探测,发现结果具有较好的一致性,说

明该系统运行稳定可靠.该雷达系统能够反映出近地面二氧化硫的空间和时间分布,具有较强的实用性,可以实现对大气中二氧化硫污染的监测.

参考文献

- [1] LIU Qi. Environmental chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
刘琦. 环境化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] WANG Ying-jian, HU Shun-xing, ZHOU Jun, *et al.* Lidar detection of atmospheric parameters[M]. Beijing: Science Press, 2014.
王英俭, 胡顺星, 周军, 等. 激光雷达大气参数测量[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [3] GOERS U B. Laser remote sensing of sulfur dioxide and ozone with the mobile differential absorption lidar[J]. *Optical Engineering*, 1995, **34**(11): 3097-3102.
- [4] SUN Jing-qun. Lidar atmospheric detection[M]. Beijing: Science Press, 1986.
孙景群. 激光大气探测[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [5] SCHOTLAND R M. Some observations of the vertical profile of water vapor by a laser optical radar[C]. Proceedings of the 4th Symposium on Remote Sensing of Environment. USA. University of Michigan Press, Ann Arbor, 12-14 April 1966.
- [6] FREDRIKSSON K, GALLE B, NYSTROM K, *et al.* Mobile lidar system for environmental probing[J]. *Applied Optics*, 1981, **20**(24): 4181-4189.
- [7] HU Shun-xing, HU Huan-ling, ZHANG Yin-chao, *et al.* Differential absorption lidar for environmental SO₂ measurements[J]. *Chinese Journal of 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.
- [8] FUJII T, FUKUCHI T, GOTO N, *et al.* Dual differential absorption lidar for the measurement of atmospheric SO₂ of the order of parts in 10⁹ [J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(6): 949-956.
- [9] WEITKAMP C. Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere[M]. Springer Science & Business, 2006.
- [10] BROWELL E V, ISMAIL S, SHIPLEY S T. Ultraviolet DIAL measurements of O₃ profiles in regions of spatially inhomogeneous aerosols[J]. *Applied Optics*, **24**(17): 2827-2836.
- [11] IMMLER F. A new algorithm for simultaneous ozone and aerosol retrieval from tropospheric DIAL measurements[J]. *Applied Physics B*, 2003, **76**(5): 593-596.
- [12] LUO Jing, LIU Dong, XU Pei-tuo, *et al.* Investigation on a high-precision polarizing beam splitting system with a polarizing beam splitter[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(12): 1210001.
罗敬, 刘东, 徐沛拓, 等. 基于偏振分光棱镜的高精度偏振分光系统[J]. 中国激光, 2016, **43**(12): 1210001.
- [13] HAO Chong, WU Yi-ming, LU Wei-guo, *et al.* The research on measuring the extinction ratio of polarizing prism accurately[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(12): 1223001.
郝冲, 吴易明, 陆卫国, 等. 偏振棱镜消光比参量精密测量方法[J]. 光子学报, 2014, **43**(12): 1223001.
- [14] CHEN Feng, SHI Dong-feng, HUANG Jian, *et al.* Analysis on molecular number density distribution in the middle atmosphere with 16 years' lidar data in Heifei[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(5): 0501001.
陈峰, 时东锋, 黄见, 等. 用瑞利激光雷达 16 年观测数据分析合肥地区大气密度分布特征[J]. 光子学报, 2015, **44**(5): 0501001.
- [15] FAN Guang-qiang, ZHANG Tian-shu, FU Yi-bin, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of ozone based on differential absorption lidar in Beijing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(10): 1014003.
范广强, 张天舒, 付毅宾, 等. 差分吸收激光雷达监测北京灰霾天臭氧时空分布特征[J]. 中国激光, 2014, **41**(10): 1014003.
- [16] VANDAELE A C, HERMANS C, FALLY S. Fourier transform measurements of SO₂ absorption cross sections; II. temperature dependence in the 29000-44000 cm⁻¹ (227-345 nm) region[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, **110**(18): 2115-2126.