

中红外差分吸收激光雷达 NO₂ 测量波长选择及探测能力模拟

徐 玲¹, 卜令兵¹, 蔡镐泽¹, 萨日娜¹, 杨 彬², 周 军²

(1. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210044;
2. 南京先进激光技术研究院, 江苏 南京 210038)

摘 要: 差分吸收激光雷达是高精度测量大范围二氧化氮浓度的有效途径。介绍了差分吸收激光雷达原理及系统结构, 基于可调谐固体激光吸收技术, 以 0.01 nm 为步长, 测量了二氧化氮在 3.410~3.435 μm 吸收光谱, 实验结果表明, 在 1.0 atm(1 atm=1.013×10⁵ Pa)、25 °C 情况下, 所测吸收光谱与模拟计算吸收光谱相关系数为 92.01%, 基于实测吸收光谱分析确定了二氧化氮测量激光波长对为 on-line 3.424 μm、off-line 3.414 μm。并研究了差分吸收激光雷达二氧化氮测量信号预处理方法和去噪算法, 仿真计算结果表明, 采用信号预处理结合多重自相关检测法, 可有效将 1 km 内模拟探测所得二氧化氮浓度反演结果误差降为±0.1 mg/m³。

关键词: 吸收光谱; 差分吸收激光雷达; 激光波长对; 去噪方法

中图分类号: TN955 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1030002

Wavelength selection and detection capability simulation of the mid-infrared DIAL for NO₂ detecion

Xu Ling¹, Bu Lingbing¹, Cai Haoze¹, Sa Rina¹, Yang Bin², Zhou Jun²

(1. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing 210038, China)

Abstract: Differential absorption lidar(DIAL) is an effective way to measure the concentration of nitrogen dioxide in extensive air with high precision. Based on the tunable solid-state laser absorption technique, the principle and systematic structure of differential absorption lidar were introduced. The absorption spectra of nitrogen dioxide in the range from 3.410 μm to 3.435 μm were measured with a step of 0.01 nm. The experimental results show that the correlation coefficient between the measured and the simulated absorption spectrum reaches to 92.01% at the standard condition (i.e., 1.0 atm, 25 °C). Based on the analysis of measured absorption spectrum, the laser wavelength pair which includes the on-line 3.424 μm and the off-line 3.414 μm is determined. In addition, the signal pre-processing and denoising methods were studied. The simulation results show that the concentration errors of nitrogen dioxide can be less than ±0.1 mg/m³ within 1 km by combining the signal pre-processing and the multiple autocorrelation.

Key words: absorption spectra; DIAL; laser wavelength pair; denoising methods

收稿日期: 2018-05-07; 修订日期: 2018-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(40805016); 江苏省自然科学基金(BK20141480, BE2015003-4)

作者简介: 徐玲(1992-), 女, 硕士生, 主要从事大气探测方面的研究。Email: xulingnuist@163.com

导师作者: 卜令兵(1976-), 男, 教授, 博士, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。Email: lingbingbu@nuist.edu.cn

0 引言

二氧化氮(NO_2)是大气中最常见的有毒性气体之一,会严重刺激人眼和呼吸道,容易结合血红蛋白导致血液输氧能力减弱,长期吸入对人体各器官危害较大,且 NO_2 还是臭氧、PAN 等光化学污染物的重要前体物^[1],也是造成交通事故的光化学烟雾形成的主要参与者,由此对化工园区 NO_2 排放源浓度分布及其流向的测量刻不容缓。差分吸收激光雷达(Differential absorption lidar, DIAL)具有高空间分辨率、扫描速度快、高探测灵敏度等特点,广泛应用于大气、海洋和陆地的遥感探测,在大气检测领域,可对大范围分布的痕量气体浓度进行实时测量^[2]。国内外关于差分吸收技术的研究大多集中于紫外波段,近年来,随着激光和半导体技术的发展,对于红外波段差分吸收激光雷达的研究也逐渐兴起。中红外波段则覆盖了众多无机分子及有机分子的吸收峰,在大气污染探测方面具有很大的潜在优势,充分利用污染气体在中红外波段大气典型窗口吸收特性,可有效提升污染气体测量的准确度和灵敏度^[3],还可测量 VOC 等其他大气污染成分。

在差分吸收激光雷达研制方面,中国科学院安徽光学精密机械研究所研制了紫外差分吸收激光雷达用于臭氧、二氧化硫、 NO_2 和气溶胶的测量,并分析了三种污染成分和气溶胶浓度空间分布规律。在中红外差分吸收激光雷达研制方面,美国 NASA 利用量子力学模型和光谱技术,将掺杂稀土的新型材料应用到中红外固体激光器研制中,提高了激光束的稳定性^[4]。在 NO_2 吸收光谱测量方面,天津大学的崔厚欣测量了 NO_2 在 410~440 nm 波段吸收截面^[5],魏合理等测量了紫外和可见光波段 NO_2 吸收光谱^[6],国外学者 Vandacle, Harder 等也研究了紫外波段 NO_2 吸收光谱, Bogumil 等人研究了 230~1 070 nm 波段 NO_2 吸收光谱特性^[7-9]。目前为止,国内外仍缺乏对中红外波段 NO_2 吸收光谱的研究。在雷达反演算法研究方面,电子科技大学的尹世荣、王蔚然采用信号平均和卡尔曼滤波技术对差分吸收激光雷达进行了信号处理,很好地估计了浓度-光程积,提高了测量精度^[10]。陈涌、王玉兰等采用小波多分辨率对 CO_2 差分吸收激光雷达中的 CO_2 激光弱回波信号进行滤波处理^[11],郭飞、王玉兰采用的小波变

换与匹配滤波耦合的方法对激光雷达回波弱信号处理,可以去除一些强干扰的噪声,但仍不能完全将信号和噪声区分开,而且匹配滤波的运算量很大,未能进行实时处理^[12]。为此,结合系统设计参数,测量 NO_2 吸收光谱,基于激光雷达信号预处理方法和去噪算法模拟雷达探测能力,为差分吸收雷达研制及微弱信号测量提供有效参考。

1 中红外差分吸收激光雷达原理及系统结构参数

差分吸收激光雷达系统发射两束窄线宽、频率稳定、波长相近的激光束,交替地沿着同一大气途径传输,其中一束波长位于 NO_2 吸收谱线吸收峰附近,称之为 on-line,另一束波长位于 NO_2 吸收谱线谷底处,称之为 off-line,同时,气体分子和气溶胶对这两束不同波长的光具有基本相同的散射能力,因此检测这两束反射光的强度差就能确定被测气体在大气中的浓度大小^[13]。中红外差分吸收激光雷达由发射系统、接收系统、扫描系统、数据采集和处理系统、系统承载平台等组成。激光发射单元由发射光源和发射光路组成,包括激光器和发射接收望远镜。激光器采用可调谐中红外激光器,其中基频泵浦源为光参量振荡器(OPO)晶体提供泵浦源能量,采用多通道介电晶体超晶格材料为核心器件,配合光参量振荡器,为雷达系统提供稳定可靠的单频窄线宽中红外波段激光,通过调整中红外激光器波长选择输出装置实现差分探测两种波长激光的交替输出^[14]。接收系统由望远镜、滤光片和光电探测器组成。数据采集和控制单元主要包括前置放大器、数据采集卡和主控计算机。图 1 为系统结构

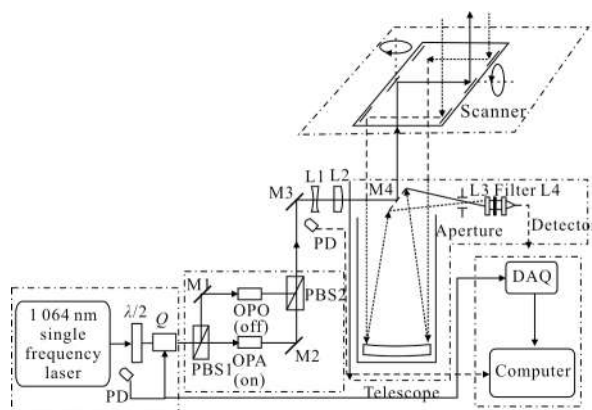


图 1 中红外差分吸收激光雷达系统结构

Fig.1 Structure of MI-DIAL system

图, 雷达系统参数如表 1 所示。

表 1 MI-DIAL 系统参数

Tab.1 System parameters of MI-DIAL

Parameter	Value
Laser wavelength	On-line: 3 424 nm Off-line: 3 414 nm
Pulse energy/mJ	1
Filter bandwidth/nm	25
Detector bandwidth/MHz	5 MHz
Detector active area/mm ²	2×2
Acquisition rate/MS·s ⁻¹	60
Pulse width/ns	20
Pulse repetition frequency/Hz	500
Laser divergence angle/mrad	<1
Detector type	VIGO-PVI-4TE-3.4
Detector responsivity/A·W ⁻¹	1.1
Acquisition card type	M2i-4960
Acquisition effectivity bit/bit	16
Receiving angle of view/mrad	1

根据差分吸收激光雷达方程^[12,15-16], 单脉冲回波功率 $P_{on,off}$ 可以表示为:

$$P_{on,off}(R) = \frac{P_t \cdot \frac{c \cdot \tau}{2} \cdot A \cdot \eta \cdot \beta(R)}{R^2} \cdot \exp\left\{-2 \int_0^R \alpha(R) + N(R) \cdot \sigma_{on,off} dR\right\} \quad (1)$$

式中: P_t 是峰值功率; c 为光速; τ 为激光雷达系统透过率; A 为望远镜面积; η 为接收系统效率; $N(R)$ 为气体浓度分布; $\sigma_{on,off}$ 为 on-line 和 off-line 的差分吸收截面; R 为探测距离; $\beta(R)$ 为大气后向散射系数; $\alpha(R)$ 为大气消光系数。

根据差分吸收激光雷达反演方程, 采用直接距离微分法求浓度分布, 对 on-line 与 off-line 回波信号强度比值求对数, 再进行距离微分即可求 NO_2 数浓度分布信息, 结合气体分子质量及阿伏加德罗常数转化为 mg/m^3 、 $\text{ppm}(10^{-6})$ 等国际标准浓度单位。当两束光波长十分接近时, 大气后向散射作用项、大气消光作用项(统称为修正项)可以忽略不计^[15], 则高度 R 处 NO_2 气体分子的数浓度计算公式如下:

$$N(R) = \frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dR} \left(-\ln \frac{P_{on}}{P_{off}} \right) \quad (2)$$

式中: $N(R)$ 代表气体浓度; $\Delta\sigma$ 为气体分子的差分吸收截面; P_{on} 和 P_{off} 为两波长回波功率。

2 波长选择

中红外波段覆盖了众多无机分子及有机分子的吸收峰, 充分利用污染气体在中红外波段大气典型窗口吸收特性, 可有效提升污染气体测量的准确性和灵敏性。 NO_2 为痕量气体, 其雷达回波信号较为微弱, 空气中水汽、甲烷等气体对其浓度反演误差影响较大。

为此, 基于 HITRAN2012 数据库, 采取逐线积分模式算法对 NO_2 2~5 μm 吸收特性进行模拟计算, 可知 NO_2 在 2~5 μm 内有两处吸收, 根据 NO_2 气体在中红外波段强吸收特性, 将激光雷达探测波长选在 3.4~3.5 μm 之间。图 2 为 NO_2 、 CH_4 、 H_2O 、 CO_2 在所选中红外波段(3.4~3.5 μm)的吸收光谱特性, NO 、 CO 及 O_3 在此波段范围内吸收系数较小, 故未考虑其影响。

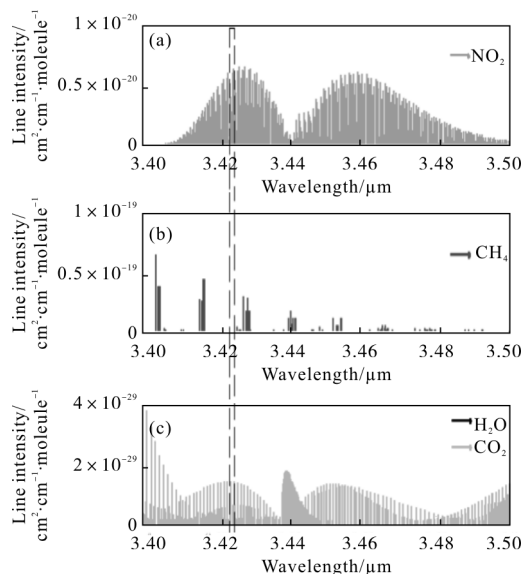


图 2 背景气体(NO_2 , CH_4 , H_2O , CO_2)在所选中红外波段(3.4~3.5 μm)的吸收光谱特性

Fig.2 Absorption spectrum characteristics of the main atmospheric components (NO_2 , CH_4 , H_2O , CO_2) in the selected infrared bands(3.4~3.5 μm)

从图中可以看出, NO_2 在 3.4~3.5 μm 有强吸收峰, 避开了主要背景气体甲烷(CH_4)吸收线的吸收峰值和谷底, 且水汽(H_2O)和二氧化碳(CO_2)在该波段吸收强度非常小, 仅为 $10^{-29} \text{ cm}^2/\text{molecule}$ 量级, 与 NO_2 的吸收截面相差八九个数量级, 而工业排放测

量所设计的激光雷达系统测量灵敏度为 10^{-6} 量级, 所以, 即便考虑正常大气中的气体含量(CO_2 : 400 ppm; H_2O : 20 000 ppm), 这些气体对待测 NO_2 影响作用小。因此, 这一波段刚好满足中红外差分吸收激光雷达探测 NO_2 气体对波长对的选择要求。

为了验证模拟光谱计算准确性及确定 on-line 和 off-line 波长对, 采用光程 500 mm 标准气体吸收池、真空泵、波长计、红外探测器、可调谐中红外激光等仪器进行测量, 在 1 atm ($1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$), $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 下, 向气体吸收池充入体积分数为 2% NO_2 标准气体(高纯 N_2 为填充气体)进行 NO_2 吸收光谱测量。实验过程中以 0.1 nm 为步长调节激光器波长, 测量了 3.410~3.435 μm NO_2 吸收光谱。

为保证实验测得数据准确性, 将实验所测吸收光谱与基于 HITRAN2012 数据库(1 atm, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 情况下)计算光谱进行比较, 如图 3 所示, 实验所测透过率光谱结果如图 3 中蓝色线所示, 模拟计算所得模拟透过率光谱如图 3 中绿色线所示, 从图中可以看出 NO_2 气体测量光谱与模拟光谱谱型符合, 在 3.410~3.435 μm 波段具有众多吸收峰和吸收谷, 且透过率绝对值和谱线峰谷精细结构差异较小。实测透过率峰值、谷值与模拟计算峰值、谷值位置基本对应, 经数据分析得出测量光谱与模拟光谱相关系数为 92.01%, 为后续改变温度测量 NO_2 吸收光谱提供依据。

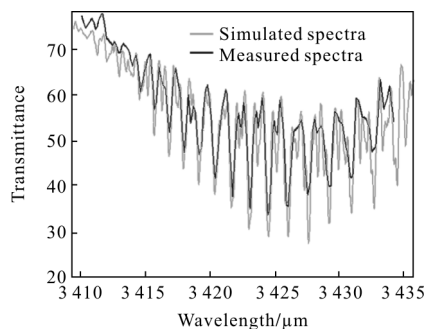


图 3 NO_2 实测光谱与模拟光谱

Fig.3 Measured and simulated spectra of NO_2

将图 3 中实验所测透过率转化为对应波长位置吸收截面, 如图 4 所示, 从图中可看出在标准状况下, NO_2 在激光波长为 3.424、3.426 μm 时, 出现吸收峰值, 吸收截面值接近于 $1.54 \times 10^{-19} \text{ cm}^2/\text{molecule}$ 。而相比于 3.424 μm , 甲烷在激光波长为 3.426 μm 处有吸收, 为减小系统误差, 选择 3.424 μm 作为

NO_2 测量 on-line, 综合实测谱线和模拟计算谱线, 此波长处对 NO_2 有强吸收峰, 谱型规则有明显峰谷结构, 且避开了背景气体甲烷的吸收影响。差分吸收激光雷达系统 on-line 与 off-line 的选择需保证波长对存在一定吸收截面差且 on-line 与 off-line 吸收线尽可能靠近。从图 4 可看出, 该吸收谱线有明显吸收谷结构, 在 3.424 μm 左侧分布有多个吸收谷, 所测波段内, 吸收截面值最低。从图中可看出, 在波长为 3.415、3.414 μm 时, 吸收截面值相近, 且在这两波段范围内, 谱线平稳, 截面值接近于 $4.9 \times 10^{-20} \text{ cm}^2/\text{molecule}$; 从图中还可看到, 分布在两吸收峰左右 3.424~3.425 μm 有两处吸收谷, 吸收截面值均近乎于 $7.54 \times 10^{-20} \text{ cm}^2/\text{molecule}$, 此两处虽与所选 on-line 吸收线较近, 但此两处吸收谱线线宽窄, 激光器波长微小变化情况下系统测量误差也较大, 需激光器波长稳定性极佳状况下系统测量值才可靠, 相比于这一组 off-line 备选波段, 前述 3.414 ~3.415 μm 波段吸收截面值平稳, 均接近于 $4.9 \times 10^{-20} \text{ cm}^2/\text{molecule}$, 选择在这一波段范围内, 波长变化对系统测量误差影响较小。为此, 选择 3.414 μm 作为 off-line。

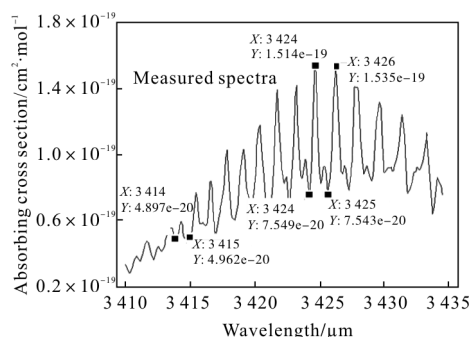


图 4 NO_2 实测光谱

Fig.4 NO_2 measured spectra

3 探测能力模拟

3.1 扣除背景噪声、多脉冲累加平均及五点滑动平滑

激光雷达系统实际测量中存在着许多的噪声源, 这些噪声将会影响到其探测精度及有效探测距离; 另一方面, 中红外波段回波信号较弱, 为保证探测能力, 需抑制本底噪声, 突显有用信号。为此, 雷达探测能力模拟时需对回波信号扣除背景噪声、多脉冲累加平均及五点滑动平滑。将每组回波信号在无信号或者信号远小于背景噪声的区间平均值作为背

景信号,然后在整个测量区间内,作为系统测量的背景噪声,将此背景值减去,以此对所测信号背景噪声扣除。此系统里选取 2.6 km 后探测的信号进行平均,予以扣除。直接探测激光雷达信号处理常使用脉冲累加平均增强有用信号,通过增加脉冲积分个数有效抑制随机成分。脉冲累加次序不同,效果有差异。根据表 1 系统参数,依据两种累加平均次序模拟计算得到的两功率对数比值如图 5 所示,可以看出先求其各功率平均值再求比值所得结果比先求比值再做平均所得结果的波动更小,为此系统采用先求脉冲累加功率平均值再求对数比值。但激光雷达信号 P_{on} 和 P_{off} 在累加平均、扣除背景后,仍然存在大气介质散射和探测器量子效应引起的统计噪声。

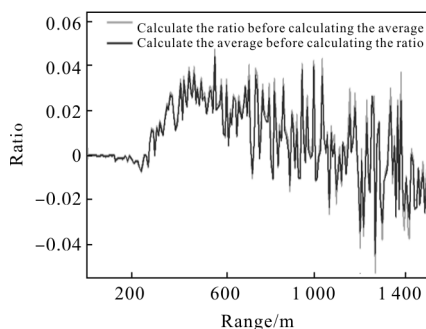


图 5 两种累加平均次序计算得到的两功率对数比值 (1000 脉冲累加)

Fig.5 Power ratio of two laser beams in two kinds of cumulative average order(1 000 pulses)

特别是当回波信号较弱时,波动往往很大,从图 5 中可看出,在累加平均之后,两功率比值的对数仍然呈现出很大程度的起伏波动,为此还需对扣除背景后的回波信号进行降噪处理。系统采用五点滑动平滑算法对回波信号进行平滑处理,如公式(3)所示:

$$P_i(R) = \frac{\sum_{j=1, i\pm 1, i\pm 2} w_j P_j(R)}{\sum_{j=1, i\pm 1, i\pm 2} w_j}, w_j = \frac{1}{(j+1-i)} \quad (3)$$

式中: $P_i(R)$ 为第 i 点的回波信号; w_j 为权重。

从图 6、7 中可以看出,单个脉冲信号受噪声影响大,两束回波信号差值体现不出来,累加到 1 000 脉冲时并且进行五点滑动平均处理后,回波差值细节已能够较好地体现出来,经过降噪处理的回波信号细节并未丢失,脉冲累加个数越多,降噪效果越好,信号逐线显示出原始的有效信息。但是对于微弱信号,累加平均后的信号误差依然较大,反演精度低,

因此,在上述信号预处理方法基础上,进一步研究了雷达回波信号的去噪算法。

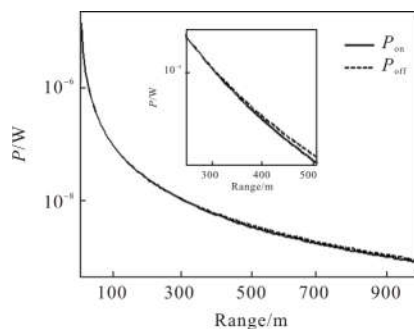


图 6 单脉冲无噪回波信号

Fig.6 Echo signal of single pulse without noise

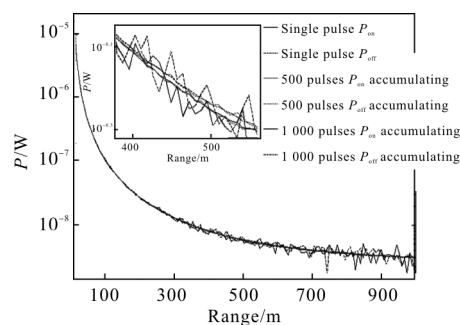


图 7 第一种脉冲累加方法并结合五点平滑处理所得信号

Fig.7 Signal of the first kind of cumulative average order and five-spot smoothing method

3.2 去噪算法——重自相关检测法

自相关函数是描述信号样本与其时移信号相似程度的函数,是关于时间间隔 τ 的偶函数^[17-18]。当 τ 足够大时,对于周期信号 $x(t)$ 的自相关函数仍然是同频率的周期信号,但随机噪声信号的自相关函数将随 τ 的增大而快速衰减,所以利用自相关函数可以有效识别含噪信号中的周期成分,消除随机成分。差分雷达发射方式为分时复用, on-line 和 off-line 交替发射,在每个距离门上有周期性时域信号。由于信号和噪声是相互独立的过程,根据自相关函数的定义,信号只与信号本身相关,与噪声不相关,而噪声之间一般也是不相关的。假设信号为 $s(t)$, 时移后的信号为 $s(t+\tau)$, 噪声为 $n(t)$, 则输入信号 $x(t)=s(t)+n(t)$, 其自相关函数如公式(4)所示,其中, R_s 为信号自相关函数, E 为数学期望,中间一项为信号与噪声互相关函数, R_n 为噪声自相关函数。

$$R_x(\tau) = E[x(t) \cdot x(t+\tau)] =$$

$$R_s(\tau) + E[s(t) \cdot n(t+\tau)] + E[s(t+\tau) \cdot n(t)] + R_n(\tau) \quad (4)$$

$$R_s(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [s(t) \times s(t+\tau)] dt \quad (5)$$

对于具有各态历经性的过程，可以利用样本函数的时间相关函数来替代随机过程自相关函数 (公式(4))。多重自相关法是在传统自相关检测法的基础上，对信号的自相关函数再做多次自相关处理。即令：

$$x_1(t) = R_x(\tau) = s_1(t) + n_1(t) \quad (6)$$

式中： $s_1(t)$ 为 $R_n(\tau)$ 和 $E(s(t+\tau) \cdot n(t))$ 的叠加； $n_1(t)$ 是 $E(s(t) \cdot n(t+\tau))$ 和 $R_n(\tau)$ 的叠加。信号经过相关运算后增加了信噪比，但其改变程度是有限的，因而限制了检测微弱信号的能力。多重相关法将 $x_1(t)$ 当作 $x(t)$ ，重复自相关函数检测方法步骤，自相关的次数越多，信噪比提高的越多。图 8 自上而下分别为交替发射的时域信号、三次自相关检测后得到的自相关函数、提取后的该距离门的信号。从计算得到的自相关函数和提取后的信号来看，明显体现出了真实信号的周期性特征。图 9 所示为重组的回波信号，保留了原始的有效信息，具有显著的去噪效果。

虽然上述方法都能够达到显著去噪和滤波效果，但从重构的回波上难以分辨出其效果，因此根据差分吸收激光雷达的气体浓度反演方程，分别使用三种方法得到浓度的反演结果，即用(1) 1 000 个脉

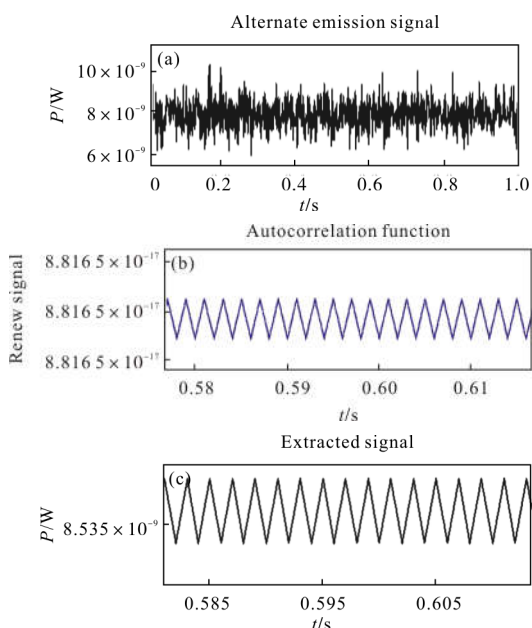


图 8 多重自相关函数原始信号及其自相关函数

Fig.8 Original signal and its autocorrelation function of multiple autocorrelation method

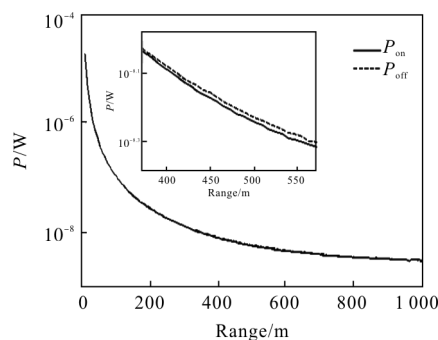
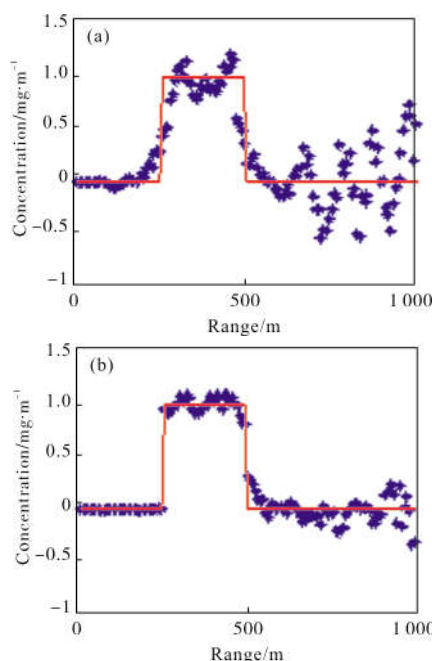


图 9 多重自相关函数去噪后重组的回波信号

Fig.9 Reconstructed echo signal of multiple autocorrelation function through denoising

冲累加平均和五点滑动平均方法、(2) 多重自相关检测法、(3) 将 1 000 个脉冲累加平均和五点平滑与相关检测结合的方法，结果如图 10 所示。其中红色线为设定的气体浓度分布，蓝色点为反演得到的浓度。可以看出，0~250 m 范围内由于功率较高而信噪比高，且无气体吸收，所以受噪声影响非常小，250~500 m 由于气体存在使得两束回波产生差值，500~1 000 m 内由于信号弱而受到噪声干扰程度大。单独使用 1 000 次脉冲累加结合五点平滑法所得浓度结果与设定值相比，误差为 $\pm 0.5 \text{ mg/m}^3$ ；单独使用多重相关检测法去噪后反演的结果误差为 $\pm 0.2 \text{ mg/m}^3$ ；将以上两种方法结合使用，在有气体存在的地方以及信噪比低的地方抑噪效果明显改善，1 km 内模拟探测所得浓度反演结果误差为 $\pm 0.1 \text{ mg/m}^3$ 。



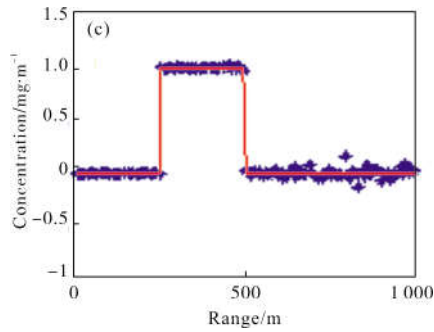


图 10 (a)脉冲累加+五点平滑去噪反演结果, (b) 多重自相关检测去噪反演结果, (c) 1 000 次脉冲累加+五点平滑+多重自相关检测去噪反演结果

Fig.10 (a) Retrieval results of cumulative average and five-spot smoothing method, (b) retrieval results of multiple autocorrelation denoising method, (c) retrieval results of 1 000 pulses cumulative average and five-spot smoothing method combined with multiple autocorrelation denoising method

4 结 论

基于 HITRAN2012 数据库和可调谐固体激光吸收技术确定了中红外波段差分吸收激光雷达 NO₂ 测量波长对, 在实际测量吸收光谱与模拟计算光谱相关性可达 92.01%的基础上, 确定了对 on-line 与 off-line 波长对的选择。将累加平均、五点滑动平滑及多重自相关检测方法引入到激光雷达弱回波信号去噪处理算法中, 对比分析仿真去噪结果表明, 结合脉冲累加平均、五点滑动平滑和多重相关检测处理回波信号, 1 km 内所得的浓度反演结果误差为 ±0.1 mg/m³。从理论研究计算和实验研究上更好地完善了激光雷达信号处理技术, 提高了差分吸收激光雷达微弱信号检测能力。

参考文献:

[1] Wang Shaolong, Lu Zhenzhen. Progress in tropospheric ozone diurnal variation and its precursors [J]. *Chemical Management*, 2016(30): 33. (in Chinese)

[2] Yan Jixiang, Gong Shunsheng, Liu Zhishen. Lidar for Environmental Monitoring [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)

[3] Coorg R P, Pierre K, Jayashree L M, et al. Tunable IR differential absorption Lidar for remote sensing of chemicals[C]//Proe SPIE, 1999, 3757: 87.

[4] Walsh B M, Lee H R, Barnes N P. Mid infrared lasers for

remote sensing applications[J]. *Journal of Luminescence*, 2016, 169: 400-405.

[5] Cui Houxin, Du Zhenhui, Chen Wenliang, et al. Effect of temperature on the absorption cross-section of NO₂ in 410 -440 nm wavelength [J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, 41(10): 1162-1166. (in Chinese)

[6] Wei Heli, Gong Zhiben, Ma Zhijun, et al. SO₂ and NO₂ absorption cross section measurements in ultraviolet and visible [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(1): 16-19. (in Chinese)

[7] Vandaele A C, Hermans C, Fally S, et al. High resolution measurement of the NO₂ visible absorption cross-section [C]//Proceedings of the EGS Symposium on Temperature and Pressure Effects, 2000.

[8] Bogumil K, Orphal J, Burrows J P. Temperature dependent absorption cross-sections of O₃, NO₂, and other atmospheric trace gases measured with the SCIAMACHY spectrometer [C]//Proceedings of the ERSENVISAT Symposium, 2000: SP-461.

[9] Harder J W, Brault J W, Johnston P V, et al. Temperature dependent NO₂ cross-sections at high spectral resolution [J]. *J Geophys Res D*, 1997, 102: 3861-3879.

[10] Yin Shirong, Wang Weiran. Signal processing for differential absorption lidar [J]. *Journal of Telemetry Tracking and Command*, 2005, 26(2): 9-12. (in Chinese)

[11] Chen Yong, Wang Yulan, Zhou Dingfu, et al. Faint signal processing of lidar based on wavelet multi-resolution analysis[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(3): 278-280, 283. (in Chinese)

[12] Guo Fei, Wang Yulan. Faint signal processing of lidar based on wavelet transform and matching filter [J]. *Laser Journal*, 2006, 27(4): 51-52. (in Chinese)

[13] Cao Nianwen, Xie Yinhai, Zhu Cunxiong, et al. SO₂-O₃-aerosol simultaneous measurements by multi-wavelength differential absorption lidar [J]. *Optical Technique*, 2015, 41(4): 289-295. (in Chinese)

[14] Zhao Gang, Jiang Xudong, Lu Xinjie, et al. Four-wavelength near and mid-infrared optical parameter oscillator based on superlattice [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42 (5): 0502004. (in Chinese)

[15] Cao Kaifa, Huang Jian, Hu Shunxing. Boundary layer ozone differential-absorption lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 2912-2917. (in Chinese)

[16] Ge Ye, Shu Rong, Hu Yihua, et al. System design and

- performance simulation of ground-based differential absorption lidar for water-vapor measurements [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63 (20): 204301-204301. (in Chinese)
- [17] Fan Xiaozhi, Wang Changguang, Huang Xiaohong, et al. An inspecting technology for weak sinusoidal signal based on wavelet analysis and multi-layer autocorrelation [J]. *Computer Applications & Software*, 2007, 24 (5): 40-41. (in Chinese)
- [18] Chen Mingkui, Liu Zhengping. The detection of weak sinusoidal signal by multi-layer auto correlation[J]. *Noise and Vibration Control*, 2006, 26(5): 28-30. (in Chinese)