

文章编号: 0258-7025(2006)06-0734-05

拉曼激光雷达信号采集及处理系统

赵曰峰¹, 张寅超^{1,2}, 洪光烈¹, 赵培涛¹, 苏 嘉¹, 方 欣¹, 谢 军¹, 屈凯峰¹

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

² 安徽省环境光学监测技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 准确可靠地监测大气中 CO₂ 含量变化对于研究全球变暖和气候变化具有十分重要的意义。利用拉曼激光雷达测量大气中的 CO₂ 含量分布是一种新颖且容易实现的方法。有效地采集 CO₂ 气体的拉曼回波信号并进行数据处理反演出测量结果是整个系统的关键所在。根据拉曼激光雷达的原理和信号处理的理论基础, 设计了单通道和双通道两种行之有效的拉曼信号采集方案, 并分别对其信号处理方法进行了论证。阐述了单通道采集过程中能量波动所造成的对信号的影响和消除方法, 重点解决了采集过程中存在的噪声干扰问题。计算了两种方案在采集 1 km 处的系统信噪比(SNR), 单通道采集时约可达到 10, 而双通道采集时可提高到 20 左右。

关键词 激光技术; 激光雷达; 拉曼信号; CO₂ 测量; 采集处理

中图分类号 TN 958.98 **文献标识码** A

Scheme on Acquisition and Disposal for Raman Lidar System

ZHAO Yue-feng¹, ZHANG Yin-chao^{1,2}, HONG Guang-lie¹, ZHAO Pei-tao¹,
SU Jia¹, FANG Xin¹, XIE Jun¹, QU Kai-feng¹

(¹ Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and
Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
² Anhui Key Laboratory of Environment Detection Technology, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract Detecting the atmospheric CO₂ reliably is becoming more and more important due to environment problems and climate changing. Raman light detection and range (lidar) system monitoring the atmosphere is a novel technique. It is a key factor to acquire the back signals of Raman lidar efficiently. The paper not only analyzes the principle of Raman lidar and the theoretical basis of signal processing, but also designs two schemes for collecting Raman signals, which include single channel and double channels, and demonstrates the methods of signal processing separately. The paper resolves the noise interference in collecting signals process, and gets the satisfied conclusion by contrasting the two results of the two schemes. Moreover, the signal-to-noise ratio (SNR) is calculated for the lidar system. The calculated results indicate that the SNR (for 1 km) is up to 10 for single channel, however, up to about 20 for double channels.

Key words laser technique; laser lidar; Raman signal; CO₂ detection; acquisition and disposal

1 引 言

利用拉曼激光雷达测量大气中 CO₂ 气体含量分布是一种行之有效的方法, 它构造简单, 费用低廉, 在测污 and 环境保护方面有着十分广阔的应用前景^[1]。

由于激光探测 CO₂ 拉曼散射过程复杂且大气

中的拉曼信号十分微弱, 拉曼激光雷达的信号采集和数据处理对整个系统的运行至关重要^[2~4]。本文设计了对拉曼信号进行采集和处理的独特方案。利用 N₂ 的拉曼散射信号作为参考信号来消除各种噪声对 CO₂ 拉曼信号的干扰, 并改进了采集方式, 从单一通道的分时监测变换到双通道对目标信号和参

收稿日期: 2005-10-20; 收到修改稿日期: 2005-11-29

基金项目: 国家 863 计划(2002AA135030)资助项目。

作者简介: 赵曰峰(1976—), 男, 山东枣庄人, 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事测污激光雷达专业研究。E-mail: yuefengzhao@126.com

考信号的同时采集。并利用 Labwindows 处理软件对数据进行处理,消除背景和噪声影响,得到理想的 CO₂ 浓度分布结果。

2 原理及系统组成

拉曼散射激光雷达探测距离为 r 处的 CO₂ 气体分子的拉曼散射回波信号电压 $P_{\text{CO}_2}(r)$ 为^[5]

$$P_{\text{CO}_2}(r) = \frac{C(\lambda_{\text{CO}_2})M_{\text{CO}_2}(r)\beta_{\text{CO}_2}(r)}{r^2} \times \exp[-2\int_0^r \sigma(r)dr], \quad (1)$$

其中 $C(\lambda)$ 为仪器常数,与拉曼散射波长有关, $M(r)$ 为待测气体分子浓度,单位为 $\text{molecules}/\text{cm}^{-3}$, $\beta(r)$ 为待测气体分子的拉曼后向散射微分截面,单位为 cm^2/Sr , $\sigma(r)$ 为大气消光系数,单位为 km^{-1} 。

根据(1)式可变化得到待测 CO₂ 气体浓度的表达式

$$M_{\text{CO}_2}(r) = \frac{P_{\text{CO}_2}(r)r^2}{C(\lambda_{\text{CO}_2})\beta_{\text{CO}_2}(r)} \exp[2\int_0^r \sigma(r)dr], \quad (2)$$

从(2)式可以看出,若 $\beta(r)$ 事先由实验测定,则由 $P_{\text{CO}_2}(r)$ 和实测值 $\sigma(r)$ 即可求得 CO₂ 分子的浓度分布 $M_{\text{CO}_2}(r)$ 。由于大气中 N₂ 的含量稳定,在实际探测中,把 N₂ 分子的拉曼后向散射微分截面 $\beta_{\text{N}_2}(r)$ 精确测定,测出 N₂ 分子的拉曼散射回波电压 $P_{\text{N}_2}(r)$ 作为参考标定值,则可获得较为可靠的 CO₂ 气体分子的浓度探测值^[6]。

同理,大气中的 N₂ 分子的回波电压可表示为

$$P_{\text{N}_2}(r) = \frac{C(\lambda_{\text{N}_2})M_{\text{N}_2}(r)\beta_{\text{N}_2}(r)}{r^2} \exp[-2\int_0^r \sigma(r)dr], \quad (3)$$

(3)式中的各项物理意义与(1)式相同,由于 CO₂ 和 N₂ 后向散射截面近似相等^[7],可推导出大气消光系数近似相等,则由(2)式和(3)式可消去大气消光系数项,变形为

$$M_{\text{CO}_2}(r) = \frac{M_{\text{N}_2}(r)C(\lambda_{\text{N}_2})P_{\text{CO}_2}(r)}{C(\lambda_{\text{CO}_2})P_{\text{N}_2}(r)} \frac{\beta_{\text{CO}_2}(r)}{\beta_{\text{N}_2}(r)}, \quad (4)$$

由于 $M_{\text{N}_2}(r)$ 可由标准大气或探空资料获得^[7]。从(4)式中可以看出,若在实验中测得 CO₂ 相对 N₂ 分子的拉曼后向散射微分截面的相对值 $\beta_{\text{CO}_2}(r)/\beta_{\text{N}_2}(r)$ 以及仪器常数的比值 $C(\lambda_{\text{N}_2})/C(\lambda_{\text{CO}_2})$,即可由两种 $P_{\text{CO}_2}(r)$ 和 $P_{\text{N}_2}(r)$ 求得 $M_{\text{CO}_2}(r)$ 。

基于上述原理,设计了拉曼激光雷达系统来检测大气中的 N₂ 和 CO₂ 气体的拉曼信号,基本结构如图 1 所示。

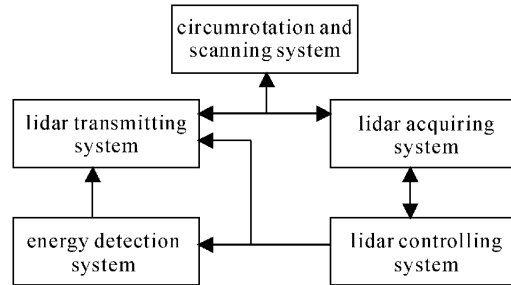


图 1 拉曼激光雷达的系统框图

Fig. 1 Block diagram of Raman lidar system

3 采集系统的设计

由于 CO₂ 气体拉曼散射回波十分微弱,要把它从强度大于其近 7 个数量级的背景光中提取出来在技术上十分困难^[6,7]。并且还要抑制光学和电子噪声的干扰,提高其信噪比(SNR),这一切都需要采集系统来完成。

3.1 单通道分时采集方案

如图 2 所示,拉曼回波由望远镜收集进入光纤,CO₂ 和 N₂ 的回波分别由中心波长为 371.68 nm 和 386.7 nm 的窄带滤光片挑选出来(经理论和实验研究,CO₂ 和 N₂ 的受激拉曼散射的一阶斯托克斯光波长分别为 371.66 nm 和 386.7 nm),经过光电倍增管(PMT)和放大器进入单通道光子计数器采集。Q 为滤光片转换开关,此开关在采集过程中由微机控制来对 CO₂ 的 N₂ 通道所选择滤光片进行切换,并在转换到 N₂ 通道时加上衰减片。

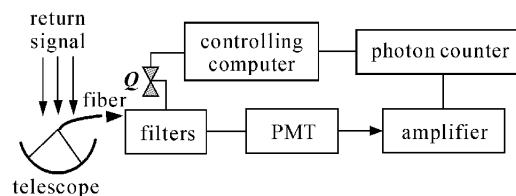


图 2 单通道采集方案示意图

Fig. 2 Scheme of single-channel acquiring

窄带滤光片对有效采集 CO₂ 气体的拉曼回波起着决定作用,它不仅要让微弱的 CO₂ 信号有效通过,还要把相近的拉曼回波干扰信号充分截止。对滤光片的性能指标提出了很高的要求,表 1 所示为本系统所用滤光片参数。

表 1 CO₂ 通道滤光片的光学参数Table 1 Specifications for filter in CO₂ channel

Narrow band filter	BARR CO ₂ produce
Peak transmission	>45%
Center wavelength	371.68±0.10 nm
Bandwidth (FWHM)	0.40±0.1 nm
Out of band block (0° incidence)	OD 5 200~1100 nm (OD: optical density) OD 6 375.4 nm, OD 7 386.7 nm, 580 nm and 607 nm OD 12 354.7 nm and 532.1 nm

在单通道采集过程中,分时对 CO₂ 和 N₂ 的拉曼回波进行光子计数积分,积分时间由控制光子计数器软件设定,在激光器脉冲频率为 20 Hz,单次脉冲计数为 10000 次的情况下,每隔约 10 min 进行一次转换。由于大气和激光器发射能量的波动,分时监测会对测量结果有显著影响。

为了解决能量波动的影响,在雷达系统的发射端进行分束监测能量(利用 Molectro 公司的 Max500 型能量计来分光监测)。从而在处理信号时消除信号中能量波动的影响。

图 3 为雷达系统激光器的能量波动情况。从图可以看出由于激光器受温度波动等因素影响,能量的波动相对还是较大的。消除能量的影响可提高信噪比。

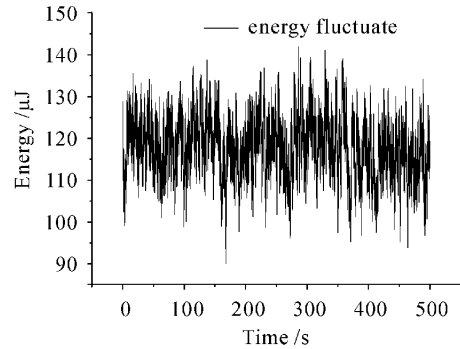


图 3 激光器的能量波动

Fig. 3 Energy fluctuation for laser

虽然从信号的角度消除了能量的影响,但是由于分时采集的不同步,无法完全消除能量波动对整个雷达系统所造成的影响。大气随时间的变化所造成的信号仍无法消除。基于以上原因,在单通道采集的基础上,设计了双通道采集方案。

3.2 双通道采集方案

图 4 为双通道采集方案,拉曼回波信号被望远镜收集,进入光纤导出后(准直后)经过分束片被分成两路分别通过 CO₂ 和 N₂ 滤光片,再分别经过倍增和放大进入双通道光子计数器从而被控制微机采集。CO₂ 的回波较弱,分束片将大部分(99%)回波信号分给其通道,而 N₂ 的回波较强,为了防止系统饱和需要在 N₂ 滤光片前加上合适的衰减片。

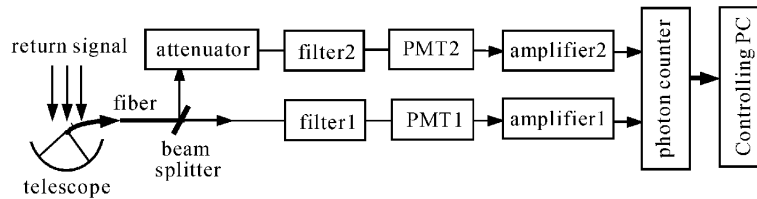


图 4 双通道采集方案示意图

Fig. 4 Scheme for double channels acquiring

利用双通道采集,CO₂ 和 N₂ 的拉曼回波被同时采集,能量的波动对回波信号所产生的强度影响以及对整个系统所造成的电子学噪声在信号处理时可基本消除,确保了信号的有效性和可靠性。

值得指出的是,本方案需要对两个通道的光学和电子学参数进行修正,以免在进行信号处理时带来大的误差。有效的解决方法是两个通道使用完全一样的光电倍增管和放大器,这样可有效消除两个通道参数不同对采集信号的影响。

4 拉曼回波信号的处理

拉曼回波信号经光子计数器积分采集后被存储成二进制文件,由一系列按距离分布的光子数点组成,光子数的多少代表回波信号的强弱并等价于回波电压信号大小^[8]。根据式(4),利用 Labwindows 软件,把数据读入处理系统,进行计算从而反演出最终的 CO₂ 浓度分布,并在处理软件上显示出分布结果。对雷达系统信噪比的计算公式为^[9]

$$\text{SNR}(R) = \frac{N_s(R)}{\sqrt{N_s(R) + 2(N_b + N_d)}} \cdot \sqrt{M}, \quad (5)$$

M 为发射的激光脉冲数, $N_s(R)$ 为接收到某一高度上的大气后向散射的光电子数, N_b 为天空背景辐射光, N_d 为探测器的暗计数。

在处理单通道数据时, 要根据监测能量的结果对回波信号进行修正, 剔除能量波动的影响。图 5 (a), (b) 分别为某一天能量影响消除前后的回波信号。从图中可以看出, 消除能量变化因素后, 雷达回波信号变得平坦且波动变小。根据 (5) 式计算可得到 1 km 处的信噪比, 能量影响消除前 $\text{SNR} \approx 6$, 而能量消除后 $\text{SNR} \approx 10$, 有较大程度的提高。

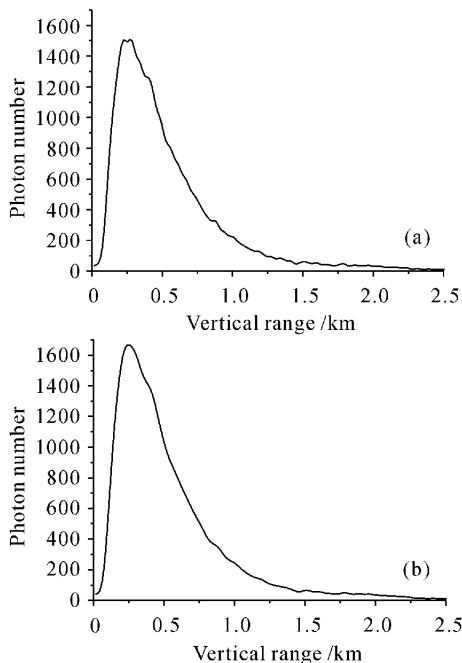


图 5 能量影响消除前(a)和消除后(b)的回波信号
Fig. 5 Return signal before (a) and after (b) eliminating the energy fluctuation influence, respectively

对双通道采集方案的回波信号, 由于两通道的同时性, 信号处理时各种光学和电子学噪声基本被消除, 从而可以得到比单通道平滑而可靠的结果。图 6(a), (b) 分别为单通道、双通道的系统信号处理数据结果(垂直方向上未定标数据)。从曲线可以看出, 双通道信号采集处理结果得到大气中 CO_2 含量分布规律随距离变化不大, 在某一较小范围内波动。而单通道信号采集处理结果是信号在一个相对较大范围内波动变化。通过具体计算, 双通道采集测量 1 km 距离处信噪比约可达到 20。显然, 双通道的测量结果要比单通道的测量结果理想得多。

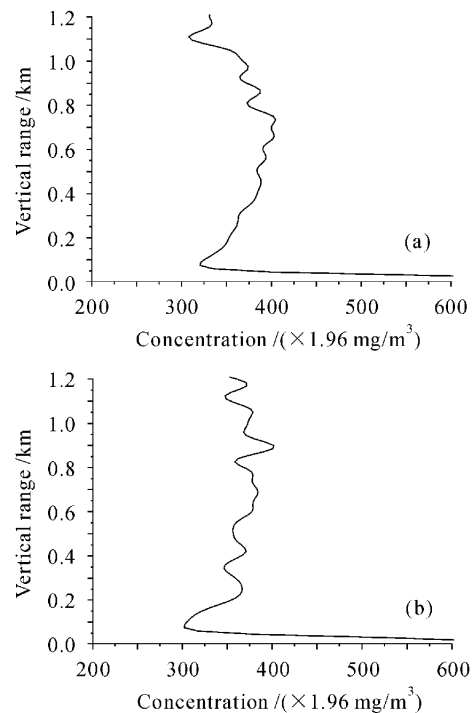


图 6 单通道(a)和双通道(b) CO_2 浓度监测结果
Fig. 6 Disposal result for single channel (a) and double channels (b) respectively

5 结 论

在拉曼激光雷达原理的基础上, 设计了两种不同的方案, 分别对难以捕捉的 CO_2 回波信号进行采集, 并对信号进行了修正和处理, 最终得到 CO_2 浓度分布结果。通过对两种方案的信号处理结果比较后发现, 双通道采集能够有效消除各种光、电噪声的干扰, 信噪比约可达到 20, 得到理想的结果。而单通道方案具有设备相对简单, 费用较低的优点, 但难以有效消除各种噪声的影响。系统采集和处理过程中, 由于滤光片的性能限制, 信号中有可能混入其他大气成分的回波(如 O_2 的拉曼信号, 气溶胶的米氏散射信号等), 测量并有效扣除这些回波对进一步提高系统信噪比和测量精度具有重要作用。

参 考 文 献

- 1 Michihiro Uchiomi, Nilesh Jvasa, Makoto Fujiwara *et al.*. Development of DIAL for CO_2 and CH_4 in the atmosphere [C]. *SPIE*, 2003, **4893**:141~149
- 2 Tamer F. Refaat, M. Nurul Abedin, Upendra N. Singh. Spectral response measurements of short wave infrared detectors (SWIR) [J]. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 2002, **12**(2):541~550
- 3 Wu Yonghua, Yue Guming, Hu Huanling *et al.*. D_2 stimulated Raman scattering pumped by fourth harmonic Nd:YAG laser and its application in laser radar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**

- (9):823~827
吴永华,岳古明,胡欢陵等. Nd:YAG 四倍频激光抽运氙后的拉曼效应及其在激光雷达中的应用[J]. 中国激光, 2000, **A27**(9): 823~827
- 4 Jae H. Park. Atmospheric CO₂ monitoring from space [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(12):2701~2712
- 5 Wu Yonghua, Hu Huanling, Hu Shunxing *et al.*. Rayleigh-Raman scattering lidar for atmospheric temperature profiles measurements [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7):851~856
吴永华,胡欢陵,胡顺星等. 瑞利-拉曼散射激光雷达探测大气温度分布[J]. 中国激光, 2004, **31**(7):851~856
- 6 Laurent de Sonouepnikoff, Vaientin Mitev, Valentin Simeonov *et al.*. Experimental investigation of high-power single-pass Raman shifters in the ultraviolet with Nd:YAG and KrF lasers [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(21):5026~5043
- 7 Luca Fiorani, Eric Durieux. Comparison among error calculations in differential absorption lidar measurements [J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, **33**(6):371~377
- 8 Tao Zongming, Zhang Yinchao, Cen Gang *et al.*. Estimating method of detecting minimum pollutant gas concentration by lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5):602~604
陶宗明,张寅超,岑岗等. 激光雷达探测污染气体最小浓度的估算方法[J]. 光学学报, 2004, **24**(5):602~604
- 9 Hu Shunxing, Hu Huanling, Zhang Yinchao *et al.*. Differential absorption lidar for environmental SO₂ measurement [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