

文章编号: 0253-2239(2007)06-0957-5

差分吸收测污激光雷达光路分束设计*

赵培涛^{1,3} 张寅超² 胡顺星¹ 赵曰峰^{1,3} 苏 嘉^{1,3} 谭 锐¹ 曹开法^{1,3} 谢 军¹
许玉龙⁴ 方 欣^{1,3} 杜小勇^{1,3}

1 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031
2 北京理工大学光电工程系光电成像与信息工程研究所, 北京 100081
3 中国科学院研究生院, 北京 100039
4 山东轻工业学院 数理学院, 济南 250353

摘要: 在 AML-2 车载测污激光雷达中, 对装有不同气体的拉曼管进行拉曼激发获得相应的强、弱吸收关波长。针对差分雷达激光发射光路转换的特点及提高雷达监测的实时性能要求, 基于激光偏振调制原理提出了激光雷达光路分束设计的新方法, 对该方法可行性进行了理论分析, 并对改进光路的能量损失进行了估算, 模拟结果显示改进后的系统延长了仪器的使用寿命, 提高了测量的实时性。为提高差分激光雷达实时监测性能提供了一种新方法。

关键词: 激光雷达; 差分吸收; 分束; 实时; 测污

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A

Design of Beam-Splitting Optical Path for Differential Absorption Air Pollution Monitoring Lidar

Zhao Peitao^{1,3} Zhang Yinchao² Hu Shunxing¹ Zhao Yuefeng^{1,3} Su Jia^{1,3} Tan Kun¹
Cao Kaifa^{1,3} Xie Jun¹ Xu Yulong⁴ Fang Xin^{1,3} Du Xiaoyong^{1,3}

1 *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031*
2 *Institute of Photoelectric Imaging and Information Engineering, Department of Optoelectronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081*
3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*
4 *School of Mathematics and Physics, Shandong Institute of Light Industry, Jinan 250353*

Abstract: The on and off wavelengths are obtained by stimulating the Raman tube filled with different gases in AML-2 air-monitoring lidar. According to the characteristic of lidar light transfer path, a new design about light which introduces the idea of beam-splitting based on polarization modulation is presented to improve the real-time performance. Feasibility of the new method is demonstrated and energy loss is evaluated. The simulated results show that the improved system increases the service life of instruments and the real-time performance of lidar. It provide a choice to improve real-time performance of differential absorption air pollution monitoring lidar in practice.

Key words: lidar; differential absorption; beam splitting, real time, pollution monitoring

1 引 言

激光雷达是进行大气监测的强有力工具, 它具

有传统取样和接触式测量不具备的优点, 可以对大范围内的污染气体进行连续、实时、快速遥感监测,

* 国家 863 计划(2002AA135030)资助项目。

作者简介: 赵培涛(1980—), 男, 山东人, 博士研究生, 主要从事大气光学及测污激光雷达技术方面的研究。

E-mail: peitaozhao@163.com

导师简介: 张寅超(1961—), 男, 浙江人, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气光学方面的研究。

E-mail: ychang@bit.edu.cn

收稿日期: 2006-07-20; 收到修改稿日期: 2006-09-29

并具有较高的分辨力。中国科学院安徽光机所成功研制了车载式大气污染监测激光雷达系统并在实际测试过程中取得了很好的效果^[1~5]。该激光雷达采用差分吸收原理对污染物进行测量,差分吸收原理对激光雷达的光源提出了特别的要求,即需要发射与待测污染气体分子吸收谱线重合的强吸收波长和稍稍偏离吸收谱线波长的弱吸收波长。两束激光回波的强度只取决于待测气体分子的吸收作用,从而根据两个波长回波强度的差分就可以确定待测气体分子的浓度^[6,7]。车载大气污染监测激光雷达系统的光源部分采用构造简单的拉曼频移光源,即对装有不同气体的拉曼管进行拉曼激发获得相应的强吸收、弱吸收波长。这就要求拉曼管不停地来回移动,从而降低了监测的实时性能和准确性以及装置的使用寿命。本文根据激光偏振分束原理,提出了一种新的激光雷达光路系统的设计方法。从理论上论证

了该方法的可行性,解决了拉曼管来回移动的问题,提高了激光雷达系统的实时性能。

2 差分吸收激光雷达光路的分束设计

2.1 AML-2 车载测污激光雷达光路

AML-2 车载测污激光雷达光路如图 1 所示。其中拉曼管组、扩束镜、倍频晶体、导向镜放在电平移台上,由计算机控制步进电机移动实现拉曼管的相互转换^[8,9]。这种方法中激光光源位置的控制精度决定于电动位移台传动导轨的定位精度和步进电机的转动精度,因此对二者要求比较高,不利于光源位置的精确确定。同时电平移台来回移动,也会降低其使用寿命,不利于对大气环境进行长时间连续测量和监控。

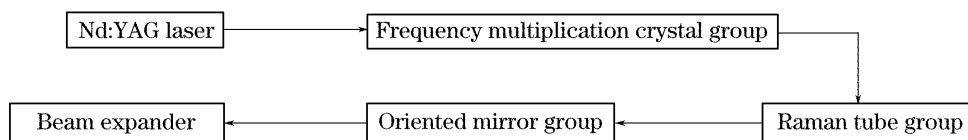


图 1 AML-2 大气环境监测激光雷达光路

Fig. 1 Light path of AML-2 lidar

2.2 准同时测量的大气波动影响分析

AML-2 车载测污激光雷达的工作方式是一组对一组地交替发射两个波长的激光。在实际测量过程中需要交叉发射 5 组 ($n=5$) 激光脉冲,每一组发射 500 个 ($N=500$)。发射 500 个脉冲用时 25 s,两个拉曼管之间的间距为 50 mm,电移台移动速度为 20 mm/s,光源由一个波长发射切换到另一个波长所需时间约为 4 s,发射 5 组共需 290 s。在这种工作方式中 ($N=500$) 两个波长激光的发射间隔时间为 29 s,在这段时间内由于大气会发生变化造成两个波长激光脉冲发射所对应的大气环境不同。在同时或交替发射的工作方法中,由于相邻两个激光脉冲发射的时间间隔很短,大气的变化可以忽略,而在累计发射脉冲的过程中,大气变化会对测量结果产生一定的影响。大气消光系数随时间的变化关系相当复杂,其中以气溶胶的变化影响最为严重。对于半径 $\alpha=100$ m 的气溶胶团块的中心浓度在 $D=10^5$ cm/s 中等湍流扩散条件下,大约经过 5 min 相对增量就下降 90%^[10]。对于尺度较小的气溶胶团块,消散过程更为迅速。在对气溶胶消光系数的实际测量过程中,由于大气活动的影响,经常导致测得的气溶胶消光系数有明显的差别^[9]。因此,要尽可

能地提高激光雷达测量的实时性能,这对于提高测量精确度具有重要的实际意义,本论文提出的激光雷达光路分束设计方法可以很好地解决这个问题。

2.3 激光雷达光路分束设计原理

对激光雷达而言,测量的实时性是一个重要指标。如前所述,AML-2 测污激光雷达采用准同时发射,要提高它的实时性可以减少 N 的数值,即减少每一组激光脉冲发射的数目同时增加发射的组数。这就要求加快电平移台移动的频率。但随着移动次数的增加,拉曼管相互替换占用的时间也会增长,对电平移台的使用寿命及精度提高非常不利。考虑到 Nd:YAG 激光器出射的是偏振性能非常好的线偏振光,我们提出了一种新的激光雷达光路设计方案,即采用偏振调制的方法实现光路分束发射。

激光雷达光路分束设计如图 2 所示,其中 Nd:YAG 激光器输出水平偏振、波长 1064 nm 的脉冲激光,格兰-泰勒偏光棱镜 P1 的透射方向为水平方向,电光晶体的 x 轴与水平方向重合。o、e 双输出棱镜 P2 的一个透射方向与水平方向重合,P3 棱镜与 P2 棱镜平行放置。各个元件的琼斯矩阵可表示为

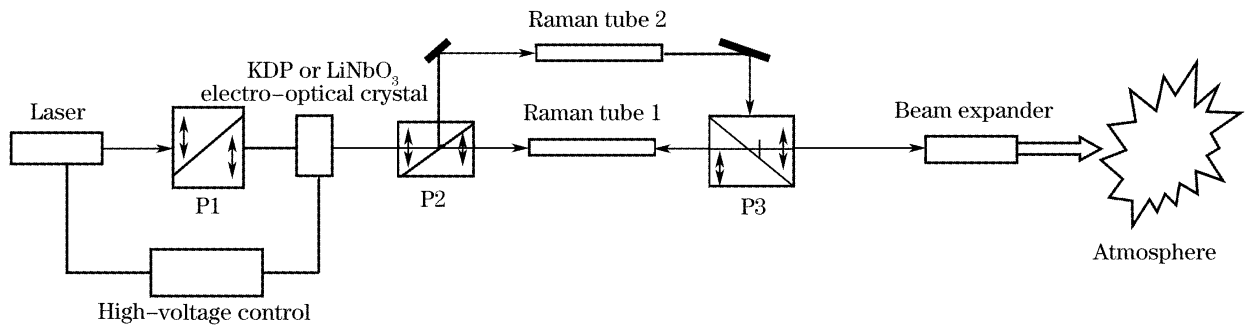


图 2 激光雷达光路分束设计图

Fig. 2 Scheme of beam-splitting for lidar

$$J_{P1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad J_{P2} = J_{P3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$J'_{P2} = J'_{P3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad J_{V/2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$J_{E-C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix},$$

其中 J_{P1} , J_{P2} (J'_{P2}), J_{P3} (J'_{P3}) 分别为 P1, P2, P3 对应的琼斯矩阵, $J_{V/2}$, J_{E-C} 分别为电光晶体为施加半波电压和不加电压的琼斯矩阵。以测量 NO_2 为例, 假设 Nd:YAG 激光器输出波长为 1064 nm 脉冲激光的光束电矢量形式为 $\mathbf{E} = \sqrt{\frac{I_0}{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$, I_0 为激光强

度, 经三倍频后变成激光波长为 355 nm。为了提高激光的偏振性能, 在光路中加入格兰-泰勒偏光棱镜 P1, 其消光比达到 10^{-5} , 光波经 P1 调制后变为偏振方向为水平方向的线偏振光。电光晶体 KDP 采用纵向电光调制方式, 线偏振光经过不加高压的电光晶体后偏振态不会发生变化, 然后通过 o, e 双输出棱镜 P2 后进入充有氧气的拉曼管 1, 对拉曼管中的氧气进行拉曼激发得到差分吸收测量的弱吸收波长 (396.82 nm), 然后进入 P3 棱镜, 后经扩束后发射到大气中, 回波信号由望远镜接收。用 $T1$ 表示这一过程的传输矩阵, 此过程用数学公式表示为

$$T1 = J_{P1} J_{P2} J_{E-C} J_{P1} \mathbf{E} =$$

$$\sqrt{\frac{I_0}{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\sqrt{\frac{I_0}{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

当对电光晶体加上半波电压时^[11], 电光晶体就相当于一个 1/2 波片, 按照如上所述的电光晶体方位, 偏振光经过电光晶体调制后, 偏振方向会发生 90° 的旋转, 通过 o, e 双输出棱镜 P2 后光束进入充有甲烷气体的拉曼管 2, 并对甲烷气体进行拉曼激发得到差分吸收的强吸收波长 (395.60 nm), 经反

光镜反射后垂直进入 P3 棱镜。由于此时光束的偏振态与 P3 棱镜的光轴垂直, 在棱镜的胶合层面上发生全反射, 后经扩束镜扩束后发射到大气中, 回波信号由望远镜接收。用 $T2$ 表示这一过程的传输矩阵, 则此过程用数学公式表示为

$$T2 = J'_{P3} J'_{P2} J_{V/2} J_{P1} \mathbf{E} =$$

$$\sqrt{\frac{I_0}{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\sqrt{\frac{I_0}{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

电光晶体的半波电压可由激光器的光脉冲进行触发控制, 电压的施加可以在瞬间完成。N 值可以在软件控制程序中设定。当 $N=100$ 时, 两个差分波长的发射时间间隔为 5 s, 较电平移台相互切换时间缩短, 有利于实时性能的提高。在两波长相互切换过程中, 只是对电光晶体施加半波电压, 不需要电平移台的来回移动, 操作简单, 避免较多的机械磨损。

2.4 激光雷达光路分束设计能量损失估计

Nd:YAG 激光器发出的 1064 nm 激光具有优异的偏振性, 可达到 80% 以上, 后经倍频后偏振性能有所下降, 但仍可达到 70% 以上。曲阜师范大学激光研究所生产的格兰-泰勒棱镜、90° o, e 光双输出棱镜选用天然晶体冰洲石作为材料^[12,13], 常规使用波段 300~2000 nm, 消光比达到 10^{-5} 。同时, 两种棱镜具有较高的抗光损伤阈值^[14], 对脉冲激光可达到 100 MW/cm^2 , 完全可以运用在高功率激光器的激光雷达探测系统中。棱镜端面经过抛光处理, 透射比可达到 90% 以上。两反射镜表面镀高反膜, 以尽可能减少能量损失。分束设计光路光能量在进入拉曼管之前较以前光路要损失 35% 左右的能量, 完全能对拉曼管中的气体进行拉曼激发。在背景辐射噪声可忽略的简化条件下 (如夜间探测时), 激光雷达信噪比的极限值为

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\max} = \left[\frac{AQ_0 c \tau \eta(R) \chi k_q \beta(R)}{4e \Delta f R^2} \right]^{1/2} \times \exp \left[- \int_0^R \sigma(r) dr \right], \quad (4)$$

其中 Q_0 为脉冲激光发射的总的光子数, τ 为激光脉宽, $\eta(R)$ 为充填系数, $\beta(R)$ 为探测物质体后向散射微分截面, $\sigma(R)$ 为传输介质的消光系数, χ 为接收系统的光学透射率, k_q 为光电探测器的光量子效率, c 为光速, A 为接收望远镜有效截面, e 为电子电荷, Δf 为接收系统电子放大显示系统的频带宽度, R 为探测距离。纵上所述, 改进的分束光路会造成发射到大气中的能量有所降低, 但是激光能量并不是影响探测信噪比的主要因素, 信噪比的大小与激光能量的 $1/2$ 次方成正比而与消光系数成指数关系衰减, 因此传输介质的消光系数是影响信噪比的重要因素。在实际的测试过程中, 激光器的氙灯由于使用时间过长而造成激光器能量的下降约 30%, 但对

实际的测试不会造成太大影响, 改进后的分束光路控制结构简单, 延长仪器的使用寿命, 并极大提高测量的实时性能。

3 光路分束设计激光雷达模拟测量结果

采用光路分束设计的激光雷达系统对大气中的 NO_2 污染物进行监测的模拟结果如图 3(a) 所示。可以看出激光雷达能在较短时间内完成对 NO_2 的监测, 测量的实时性能得到提高。图 3(b) 为模拟测量计算的同时对气溶胶的消光系数的测试结果。由图 3(b) 可以看出, 对流层底部的气溶胶消光系数在短时间内发生较大变化, 说明当时的大气活动较为活跃。模拟结果充分显示, 激光雷达光路分束设计原理正确, 实验方案切实可行, 并且能极大提高激光雷达的实时性能, 对激光雷达大气污染物监测功能的完善与提高具有一定的指导意义。

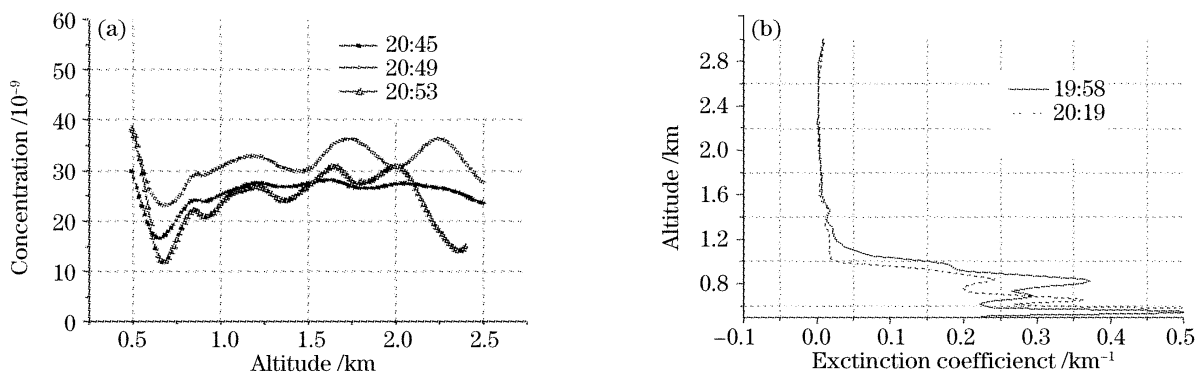


图 3 (a) 光路分束设计激光雷达对 NO_2 污染物的模拟结果, (b) 模拟测量计算时大气气溶胶的消光系数

Fig. 3 Simulated results of NO_2 concentration with beam-splitting lidar (a), extinction coefficient of aerosol (b)

4 结 论

差分测污激光雷达作为大气污染监测的强有力工具能对大气中的污染物进行大范围内的实时、快速、准确的遥感测量。为了提高激光雷达的实时性能, 基于激光偏振调制原理提出了一种新颖的光路分束设计方案。经分析模拟计算, 该方案不仅能极大提高激光雷达测量的实时性能, 而且具有控制结构简单, 延长仪器使用寿命等一系列优点, 具有极大的实际应用价值。

参 考 文 献

- Zhang Yinchao, Hu Huanling, Tan Kun *et al.*. Development of a mobile lidar system for air pollution monitoring[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1025~1031 (in Chinese)
张寅超, 胡欢陵, 谭 锐 等. AML-1 车载式大气污染监测激光雷达样机研制[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1025~1031
- Zhang Gaixia, Zhang Yinchao, Hu Shunxing *et al.*.

- Measurement of planetary boundary layer aerosols with mobile Lidar AML-1[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **16**(3): 286~290 (in Chinese)
张改霞, 张寅超, 胡顺星 等. AML-1 车载污染监测激光雷达探测大气边界层气溶胶[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(3): 286~290
- Zhang Yinchao, Hu Huanling, Shao Shisheng *et al.*. Measurement of SO_2 , NO_2 and O_3 in Beijing by DIAL[J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2006, **23**(3): 346~350 (in Chinese)
张寅超, 胡欢陵, 邵石生 等. 北京市大气的 SO_2 , NO_2 和 O_3 激光雷达监测实验[J]. *量子电子学报*, 2006, **23**(3): 346~350
- Zhang Gaixia, Zhang Yinchao, Hu Shunxing *et al.*. Slant measurement of atmospheric boundary layer aerosol with mobile lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1015~1019 (in Chinese)
张改霞, 张寅超, 胡顺星 等. 车载测污激光雷达对大气边界层气溶胶斜程探测[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1015~1019
- Yu Shihua, Zhang Yinchao, Qu Kaifeng. SO_2 Measurements near the power plant with mobile lidar[J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2006, **23**(3): 351~354 (in Chinese)
余诗华, 张寅超, 屈凯峰. 车载测污激光雷达电厂周边 SO_2 测量研究[J]. *量子电子学报*, 2006, **23**(3): 351~354

- 6 Hu Shunxing, Hu Huanling, Wu Yonghua *et al.*. Experimental studies of dual lidar method for troposphere ozone measurement [J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 1999, **11**(5): 583~586 (in Chinese)
胡顺星, 胡欢陵, 吴永华 等. 双差分测量对流层臭氧的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(5): 583~586
- 7 Liu Xiaoqin, Zhang Yinchao, Hu Huanling *et al.*. Remote monitoring of sulfur dioxide using a mobile lidar system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(2): 151~156
- 8 Hu Shunxing. Studies of the differential absorption lidar based on Raman-shifted techniques and variation analysis of ozone profiles measured at Hefei[D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, 2003
胡顺星. Raman 光源差分吸收激光雷达技术研究和合肥臭氧廓线的测量及其变化特征分析[D]. 合肥: 中科院安徽光学精密机械研究所, 2003
- 9 Tao Zongming. Optimization of laser source for AML-2 atmosphere monitoring lidar and elementary experiment investigation[D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Science
陶宗明. AML-2 大气环境监测激光雷达光源研制和测量初步研究[D]. 合肥: 中科院安徽光学精密机械研究所
- 10 Sun Jingqun. *Laser Monitoring the Atmosphere* [M]. Beijing: Science Press, 1986. 69~108 (in Chinese)
孙景群. 激光大气探测[M]. 北京: 科学出版社, 1986. 69~108
- 11 Chen Chunrong, Wang Xuerong. Blend the semiwave voltage of the crystal and test ratio of dulling-rag and microcomputer management system[J]. *J. Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*, 2001, **24**(4): 19~22 (in Chinese)
陈春荣, 王学荣. 晶体的半波电压消光比测试及微机管理系统[J]. *长春光学精密机械学院学报*, 2001, **24**(4): 19~22
- 12 Wu Fuquan, Huang Jiayin, Feng Taizhong *et al.*. Research on beamsplitting intensity ratio of 90° polarization beamsplit prism [J]. *Laser Technology*, 1994, **18**(5): 310~312 (in Chinese)
吴福全, 黄家寅, 封太忠 等. 90°分束偏光镜光强分束比研究[J]. *激光技术*, 1994, **18**(5): 310~312
- 13 Gao Honggang, Pei Qingkui. The design of Glan-Taylor polarizing prism[J]. *Laser Technology*, 1994, **18**(3): 186~189 (in Chinese)
高宏刚, 裴庆魁. Glan-Taylor 偏光棱镜的设计[J]. *激光技术*, 1994, **18**(3): 186~189
- 14 Song Lihe, Hong Guang. Technology of iceland spar polarized light prism manufacture and its performance test [J]. *Optical Technique*, 1994, (1): 15~19 (in Chinese)
宋利鹤, 洪光. 冰洲石偏光棱镜性能测试及制造工艺[J]. *光学技术*, 1994, (1): 15~19