

文章编号: 0253-2239(2004)05-602-3

激光雷达探测污染气体最小浓度的估算方法

陶宗明¹ 张寅超¹ 岑 岗² 胡顺星¹ 刘小勤¹ 邵石生¹ 吕勇辉¹ 张改霞¹ 胡欢陵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, 合肥 230031)
(² 浙江科技学院现教中心, 杭州 310012)

摘要: 探测大气中污染气体的浓度是激光雷达的一个重要应用方面, 最小可探测浓度是衡量一个雷达系统的重要指标。从测量的误差理论出发, 分析得出了一般情况下, 被测量最小值的估算方法: 当被测量的相对误差为 100% 时, 此时的被测量的大小就是可探测量的最小值。把此方法应用到激光雷达中来, 得出了差分吸收激光雷达和拉曼雷达探测污染气体最小浓度估算公式, 并把它们与已有的估算公式进行了比较, 指出了原有估算公式的不足。

关键词: 应用光学; 激光雷达; 污染气体; 误差; 最小可探测浓度

中图分类号: TH765.8⁺2 文献标识码: A

Estimating Method of Detecting Minimum Pollutant Gas Concentration by Lidar

Tao Zongming¹ Zhang Yinchao¹ Cen Gang² Hu Shunxing¹ Liu Xiaoqin¹
Shao Shisheng¹ Lü Yonghui¹ Zhang Gaixia¹ Hu Huanling¹

¹ Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031
² Department of Educational Information Technology, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310012

(Received 19 March 2003; revised 30 June 2003)

Abstract: Detecting the density of pollutant gas is one of the important applications of lidar. The minimum detectable concentration is a key index of lidar. According to error theory, the estimating method of detectable minimum quantity is obtained: when the relative error is 100%, the quantity is the detectable minimum one. Using this method, minimum pollutant gas concentration formula is got by differential absorption lidar and Raman lidar, their comparison with ones in some literatures is made and shortage in the literatures is pointed out.

Key words: applied optics; lidar; pollutant gas; error; minimum detectable concentration

1 引 言

大气是人类赖以生存的 necessary 物质。由于人类活动, 尤其是工业生产的发展, 导致了大气质量的日益恶化。因此对大气环境状况进行连续大面积的监测已是我们面临的重要任务。目前, 监测大气污染有多种方法, 如化学方法和光谱学方法。激光雷达探测^[1,2]、差分光学吸收光谱方法^[3~5]就是其中典型的

代表。

任何一种探测方法都存在一个测量下限。测量污染气体的浓度也存在一个最小探测浓度问题, 但不同的方法可探测到的最小浓度是不同的。分析估算出这个最小可探测浓度, 有利于我们弄清楚各种方法的优劣和适用范围, 指导我们提高最小可探测浓度的有效途径。

2 估算测量最小浓度的一般方法

一般情况下, 对一个被测量 y 的间接测量可以

E-mail: zmtao@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2003-03-19; 收到修改稿日期: 2003-06-30

表示为几个直接测量量 (x_1, x_2, \dots) 的某种函数关系^[6],即

$$y = f(x_1, x_2, \dots), \quad (1)$$

间接测量结果可表示为

$$y = \bar{y} \pm \sigma(y), \quad (2)$$

其中 \bar{y} 为间接测量结果的平均值, $\sigma(y)$ 为间接测量结果的误差。根据误差传递理论,间接测量的误差与直接测量的误差 $\sigma(x_i)$ 之间关系为

$$\sigma(y) = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 \sigma^2(x_1) + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 \sigma^2(x_2) + \dots}, \quad (3)$$

$\sigma(y)$ 的大小表示测量值的波动情况,而测量的精度用相对误差 E 来表示,即

$$E = \sigma(y) / \bar{y}, \quad (4)$$

相对误差小,测量精度就高;反之,相对误差大,测量精度就低。当相对误差大于100%时,被测量的可信度就受到怀疑。从有效数字的角度来看,被测量值的有效数字最后一位与误差位对齐,有效数字后面的数字是没有意义的。如果被测量的值小于误差大小,则被测量的值是没有意义的。因此,被测量可探测到的最小值就可用它的误差大小来表示,即

$$y_{\min} = \sigma(y). \quad (5)$$

3 差分吸收激光雷达探测污染气体最小浓度的估算

差分吸收雷达(DIAL)是探测微量气体的一种有效方法^[7,8]。它需要双波长,其中一个激光波长 λ_0 恰好位于待测气体分子的中心吸收谱线上,而另一个激光波长 λ 则偏离待测气体分子的中心吸收谱线,且尽可能位于待测气体分子吸收光谱带的谷值,两激光波长相差甚微。差分吸收雷达根据使用情况又可分为长程差分吸收雷达和距离分辨差分吸收雷达。

3.1 长程差分吸收雷达

对于长程差分吸收雷达,文献[1]给出了被测气体浓度 N_p 的表达式为:

$$N_p = \frac{\ln[P_t(\lambda_0)V(\lambda)/P_t(\lambda)V(\lambda_0)]}{2R\Delta\sigma_p^0}, \quad (6)$$

其中 $\Delta\sigma_p^0$ 为被测气体分子在两激光波长 λ_0 和 λ 处的吸收截面之差, R 为激光与角反射物之间的距离, $P_t(\lambda_0), P_t(\lambda), V(\lambda_0), V(\lambda)$ 为四个直接测量量, $P_t(\lambda_0), P_t(\lambda)$ 分别是两发射的激光功率, $V(\lambda_0), V(\lambda)$ 分别是两接收的电压信号。而其它量可以认为是常量。则根据(3)式, N_p 的误差可表示为

$$\sigma(N_p) = \frac{1}{2R\Delta\sigma_p^0} \sqrt{\left\{\frac{\sigma[P_t(\lambda_0)]}{P_t(\lambda_0)}\right\}^2 + \left\{\frac{\sigma[P_t(\lambda)]}{P_t(\lambda)}\right\}^2 + \left\{\frac{\sigma[V(\lambda)]}{V(\lambda)}\right\}^2 + \left\{\frac{\sigma[V(\lambda_0)]}{V(\lambda_0)}\right\}^2}, \quad (7)$$

在四个直接测量量 $P_t(\lambda_0), P_t(\lambda), V(\lambda_0), V(\lambda)$ 中。一般 $V(\lambda_0)$ 最小,而它们各自的误差 σ 却几乎是相等的,故作为近似,(7)式又可写为

$$\sigma(N_p) = \frac{1}{2R\Delta\sigma_p^0} \frac{\sigma[V(\lambda_0)]}{V(\lambda_0)}, \quad (8)$$

根据(5)式,可得长程差分吸收雷达探测污染气体的最小浓度为

$$N_{p\min} = \frac{1}{2R\Delta\sigma_p^0} \frac{\sigma[V(\lambda_0)]}{V(\lambda_0)}, \quad (9)$$

该结论与文献[7,8]的结论是一致的^[9]。

3.2 距离分辨差分吸收雷达

对于距离分辨差分吸收雷达,文献[10]给出了被测气体浓度的表达式为

$$N_p(R) = \frac{1}{2\Delta R\Delta\sigma_p^0} \left[\ln \frac{V(\lambda_0, R)V(\lambda, R + \Delta R)}{V(\lambda_0, R + \Delta R)V(\lambda, R)} \right], \quad (10)$$

其中 R 为探测点距激光雷达的距离, $V(\lambda_0, R), V(\lambda_0, R + \Delta R), V(\lambda, R), V(\lambda, R + \Delta R)$ 分别为波长 λ_0 时 R 处及 $R + \Delta R$ 处和波长 λ 时 R 处及 $R + \Delta R$ 处接收电压信号,而其他量可以认为是常量。则根据(3)式, $N_p(R)$ 的误差可表示为

$$\sigma(N_p) = \frac{1}{2\Delta R\Delta\sigma_p^0} \sqrt{\left\{\frac{\sigma[V(\lambda_0, R)]}{V(\lambda_0, R)}\right\}^2 + \left\{\frac{\sigma[V(\lambda_0, R + \Delta R)]}{V(\lambda_0, R + \Delta R)}\right\}^2 + \left\{\frac{\sigma[V(\lambda, R)]}{V(\lambda, R)}\right\}^2 + \left\{\frac{\sigma[V(\lambda, R + \Delta R)]}{V(\lambda, R + \Delta R)}\right\}^2}, \quad (11)$$

在四个直接测量量 $V(\lambda_0, R), V(\lambda_0, R + \Delta R), V(\lambda, R), V(\lambda, R + \Delta R)$ 中,它们各自的误差 σ 却几乎是相等的,若它们各自的大小相当,则(11)式可近似为

$$\sigma(N_p) = \frac{1}{\Delta R\Delta\sigma_p^0} \frac{\sigma[V(\lambda_0, R)]}{V(\lambda_0, R)}, \quad (12)$$

在这种情况下,由(5)式可得

$$N_{p\min} = \frac{1}{\Delta R \Delta \sigma_p^0} \frac{\sigma[V(\lambda_0, R)]}{V(\lambda_0, R)}, \quad (13)$$

这个结果比文献[10]给出的结果大一倍。

若其中有一个相对较小,并假定为 $V(\lambda_0, R + \Delta R)$, 则(11)式可近似为

$$\sigma(N_p) = \frac{1}{2\Delta R \Delta \sigma_p^0} \frac{\sigma[V(\lambda_0, R + \Delta R)]}{V(\lambda_0, R + \Delta R)}, \quad (14)$$

在这种情况下,由(5)式可得

$$N_{p\min} = \frac{1}{2\Delta R \Delta \sigma_p^0} \frac{\sigma[V(\lambda_0, R + \Delta R)]}{V(\lambda_0, R + \Delta R)}, \quad (15)$$

这个结果与文献[10]给出的结论是一致的。比较(9)式,(13)式和(15)式可知,测量同种污染气体,一般情况下长程差分吸收雷达探测灵敏度要比距离分辨差分吸收雷达高。

4 拉曼激光雷达探测污染气体最小浓度的估算

拉曼激光雷达是根据分子的拉曼散射原理制造的,它不但可以测浓度,还可以对分子的种类进行鉴别。文献[1]给出其测量气体浓度的表达式为

$$N_p(R) = \frac{V(R)R^2}{C_A(\lambda_p)\beta_p^0} \exp\left[2\int_0^R \sigma(r)dr\right], \quad (16)$$

其中 $V(R)$ 为距离为 R 处被测气体分子喇曼散射回波电压, $C_A(\lambda_p)$ 为激光雷达的仪器常量, $\sigma(r)$ 为大气消光系数, β_p^0 为气体分子的喇曼后向散射微分截面且非常小,所以探测到的信号 $V(R)$ 非常弱,有时几乎和噪声相当。文献[1]给出了电压信噪比公式

$$\left(\frac{S}{N}\right)_v = \left(\frac{A\chi k_0}{4e\Delta f}\right)^{1/2} \times \left\{ \frac{E_0 c \eta(R) N_p(R) \beta_p^0}{R^2} \exp\left[-2\int_0^R \sigma(r)dr\right] \right\}^{1/2}, \quad (17)$$

其中 S 为信号, N 为噪声, A 为激光雷达接收截面, χ 为激光雷达接收系统的光学透过率, k_0 为光电探测器的灵敏度, e 为电子电量, Δf 为电子放大显示系统的频带宽度, E_0 为脉冲激光总能量, c 为光速, $\eta(R)$ 为充填系数。当测量的相对误差为 100% 时,电压信噪比 $(S/N)_v$ 为 1。故上式中电压信噪比 $(S/N)_v$ 为 1 时所对应的浓度可测到最小测浓度,即

$$N_{p\min}(R) = \frac{4e\Delta f R^2}{A\chi k_0 E_0 c \eta(R) \beta_p^0} \exp\left[2\int_0^R \sigma(r)dr\right], \quad (18)$$

该结论与文献[1]是一致的。由于气体分子的拉曼后向散射差分截面很小很小,根据(18)式可以看出,

它的最小可探测浓度要比差分吸收雷达大得多,即灵敏度较低。

结论 运用误差分析的方法,得出了这样的结论:最小可探测量的大小就等于该探测量的误差大小,或者说,当相对误差等于 100% 时,被测量的大小就是它的最小可探测量。根据此方法算出长程差分吸收雷达、距离分辨差分吸收雷达、拉曼激光雷达探测污染气体的最小可探测浓度表达式,并把这些表达式与已有文献中的结论进行比较,得出本文导出的长程差分吸收雷达、拉曼激光雷达的最小可探测浓度表达式与文献[1,7,8]中的结论是一致的;而本文导出的距离分辨差分吸收雷达最小可探测浓度表达式与文献[10]中的结论是有区别的。此外,本文导出的一般情况下的最小可探测量公式(5),可推广到任何测量中去。

参 考 文 献

- 1 Sun Jinqun. *Laser Atmospheric Detection* (激光大气探测). Beijing: Science Press, 1986 (in Chinese)
- 2 Wu Yonghua, Yue Guming, Hu Huanling *et al.*. D₂ Stimulated Raman scattering pumped by fourth harmonic Nd:YAG laser and its application in laser radar. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2000, **27**(9):823~827 (in Chinese)
- 3 Zhou Bin, Liu Wenqing, Qi Feng *et al.*. Error analysis in differential optical absorption spectroscopy. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(8):957~961 (in Chinese)
- 4 Qi Feng, Liu Wenqing, Zhou Bin *et al.*. Improving DOAS system measurement precision with artificial neutral network method. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(11):1345~1349 (in Chinese)
- 5 Gao Xiaoming, Huang Wei, Li Ziyao *et al.*. Sensitive detection of CO₂ molecule using near infrared diode laser absorption spectroscopy. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(5):609~611 (in Chinese)
- 6 Du Yilin, Sun Wenbin, Ling Jie. *College Experimental Physics* (大学实验物理教程). Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2002 (in Chinese)
- 7 Menyuk N, Killinger D K, DeFeo W E. Laser remote sensing of hydrazine, MMH, and UDMH using a differential-absorption CO₂ lidar. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(12):2275~2286
- 8 Killinger D K, Menyuk N. Remote probing of the atmosphere using a CO₂ DIAL system. *IEEE, J. Quant. Electron.*, 1981, **17**(9):1917~1929
- 9 Tao Zongming, Zhang Yinchao, Hu Shunxing *et al.*. The estimated method of detecting pollutant gas minimum density by DIAL. *Proc. of The Second Conference of Anhui and Jiangsu Atmospheric Detection, Environmental Remote Sensing and Electronic Technology*, Hefei, 2003 (in Chinese)
- 10 Song Zhengfang. *The Foundation of Applied Atmospheric Optics* (应用大气光学基础). Meteorology Press, 1990 (in Chinese)