

文章编号: 0258-7025(2009)11-3002-05

自适应滤波在拉曼激光雷达数据处理中的应用

范广强^{1,2} 胡顺星¹ 谢 军¹ 闫顺生^{1,2} 汪少林^{1,2} 赵培涛^{1,2} 胡欢陵¹

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 在拉曼(Raman)激光雷达探测 CO₂ 实验中所采集的拉曼回波信号具有比较大的统计误差,有效减小统计误差,获得较高的探测精度是非常重要的工作。利用自适应滤波器对拉曼回波信号分段进行数据处理,可得到在分段的各个空间间隔内的随距离几乎不变的 CO₂ 混合比统计误差,经过自适应滤波器对信号进行处理后,Raman 激光雷达对合肥地区夜晚 CO₂ 气体浓度探测达到比较高的测量精度,在 1.5~5 km 高度范围内,CO₂ 浓度统计误差最大为 2.5%,5~8 km 统计误差最大为 5%,8~10 km 统计误差最大为 10%。利用此技术也可以量化估计在较高的空间分辨率下满足探测精度要求的激光脉冲数。

关键词 激光雷达; CO₂ 气体; 自适应滤波器; 统计误差

中图分类号 TN958.98; TP273+.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.3002

Application of the Adaptive Filter to the Data Processing for Raman Lidar

Fan Guangqiang^{1,2} Hu Shunxing¹ Xie Jun¹ Yan Shunsheng^{1,2}
Wang Shaolin^{1,2} Zhao Peitao^{1,2} Hu Huanling¹

¹ Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract It is important to decrease the statistical error for improving the measurement precision of Raman lidar for the large statistical error of the Raman backscattering signals. An adaptive filter signal processing technique is applied to the Raman lidar for atmospheric CO₂ measurement by subsection, and the result of the statistical error of the atmospheric CO₂ mixing ratio changes little with detecting range in each subsection. After signal processing by the technique, we obtained the high precision of Raman lidar measurement of atmospheric CO₂ concentration at night in Hefei. The maximum statistical error of atmospheric CO₂ concentration was 2.5% from 1.5 to 5 km, 5% from 5 to 8 km, and 10% from 8 to 10 km. The technique also can be used to determine the number of laser shots necessary for a desired statistical accuracy and spatial resolution.

Key words laser radar; atmospheric CO₂; adaptive filter; statistical error

1 引 言

空气中的 CO₂ 在影响地球温度和气候变化方面起着重要作用^[1~5],准确可靠地探测大气中 CO₂ 的含量分布特征对于预测未来 CO₂ 浓度变化和建立合适的 CO₂ 排放策略有着极其重要的意义。其中,拉曼激光雷达^[6~8]是探测对流层 CO₂ 浓度分布

的一种先进可靠的工具。

拉曼激光雷达探测到的空气分子拉曼后向散射回波信号具有随机起伏的特征,服从泊松分布^[9]。由于拉曼回波信号满足泊松分布给测量 CO₂ 带来了比较大的误差,通常把这种误差称为统计误差。在拉曼激光雷达测量 CO₂ 过程中,拉曼回波信号与

收稿日期: 2008-10-08; 收到修改稿日期: 2009-02-27

基金项目: 科技部科技基础性工作专项(2007FY110700)资助课题。

作者简介: 范广强(1982—),硕士研究生,主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: fanguangqiang456@163.com

导师简介: 胡顺星(1966—),博士,副研究员,主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: sxhu@aiofm.ac.cn

距离的平方成反比,在近地端由于过渡区几何因子^[10]的影响拉曼回波信号增加,到达一定高度后拉曼回波信号开始衰减。统计误差则随着信号的衰减而增加。为了减少 CO₂ 的统计误差同时达到一定探测精度需要对采集到的拉曼回波信号进行滤波,一般的滤波如移动平滑滤波虽然在一定程度上也减少了统计噪声,但是并不能达到需求的精度。自适应滤波器^[11]可按照需求的测量精度选择空间分辨率从而得到探测需要,具有比较大的优越性。

在 CO₂ 探测实验中,提出了自适应滤波器分段对拉曼回波信号进行滤波,得到了具有较高探测精度的,在分段的各个空间间隔内的随距离几乎不变的统计误差。并且在需要时利用自适应滤波器可以量化估计在比较高的空间分辨率下满足探测精度要求的激光脉冲数。

2 测量实验

采用 YAG980 型 Nd:YAG 激光器,调 Q 单模输出 354.71 nm 波长的激光,脉冲重复频率为 20 Hz,通过调节光束导向镜使发射光束垂直导向天空。354.71 nm 波长的激光激发空气中的 CO₂ 和 N₂ 分子,分别产生出 CO₂ 和 N₂ 拉曼后向散射信号,两种信号被望远镜接收后,经小孔光阑、反射式耦合器由光纤传送到分色片系统,被光电倍增管探测后经过放大器放大,由多通道光子计数器检测信号,并将结果传给计算机实时显示和贮存。探测 CO₂ 的实验需要在天气晴朗的夜晚进行。共采集 6 组 CO₂ 和 N₂ 拉曼后向散射信号,从近地面开始采集,每隔 30 m 采集一个点,每组发射 10000 发激光脉冲,每组采集用时大约 8 min。

3 理论分析

拉曼激光雷达接收到的 CO₂ 分子的拉曼散射回波信号表示为^[12]

$$P_{\text{CO}_2,k} = \frac{C_{\text{CO}_2}}{z^2} \beta_{\text{CO}_2} n_{\text{CO}_2,k} \times \exp\left\{-\int_{z_0}^z [\alpha_{\lambda_c}(z) + \alpha_{\lambda_p}(z)] dz\right\}, \quad (1)$$

式中 $P_{\text{CO}_2,k}$ 为第 k 空间间隔内的 CO₂ 气体分子的拉曼回波信号强度; C_{CO_2} 表示仪器常数; β_{CO_2} 为待测 CO₂ 气体分子的拉曼后向散射微分截面,单位为 cm²/sr; $n_{\text{CO}_2,k}$ 为 CO₂ 气体分子的分子密度,单位为 cm⁻³; z_0 表示激光雷达所在的高度; $\alpha_{\lambda_c}(z)$ 表示在

第 k 空间间隔所在高度 z 处激发波长为 λ_p 时的大气消光系数; $\alpha_{\lambda_c}(z)$ 表示第 k 空间间隔所在高度 z 处拉曼散射波长为 λ_c 时的大气消光系数,单位为 km⁻¹。

参考气体 N₂^[13] 的拉曼回波表示为

$$P_{\text{N}_2,k} = \frac{C_{\text{N}_2}}{z^2} \beta_{\text{N}_2} n_{\text{N}_2,k} \exp\left\{-\int_{z_0}^z [\alpha_{\lambda_{\text{N}_2}}(z) + \alpha_{\lambda_p}(z)] dz\right\}, \quad (2)$$

由(1)式,(2)式可得 CO₂ 混合比为

$$q_k = C_w \frac{P_{\text{CO}_2,k}}{P_{\text{N}_2,k}} \exp\left\{\int_{z_0}^z [\alpha_{\text{CO}_2}(z) - \alpha_{\text{N}_2}(z)] dz\right\}, \quad (3)$$

其中系统常数 $C_w = \frac{C_{\text{N}_2} \beta_{\text{N}_2}(\pi) M_{\text{CO}_2} n_{\text{N}_2}}{C_{\text{CO}_2} \beta_{\text{CO}_2}(\pi) M_{\text{dry}} n_{\text{dry}}}$ 。CO₂ 混合比的统计不确定度可以表示为^[14,15]

$$\frac{\delta q_k}{q_k} = \left[\left(\frac{\delta P_{\text{CO}_2,k}}{P_{\text{CO}_2,k}} \right)^2 + \left(\frac{\delta P_{\text{N}_2,k}}{P_{\text{N}_2,k}} \right)^2 + \Delta_{\text{other}}^2 \right]^{1/2}, \quad (4)$$

其中 $\delta P_{\text{CO}_2,k}$, $\delta P_{\text{N}_2,k}$ 分别是信号 $P_{\text{CO}_2,k}$, $P_{\text{N}_2,k}$ 的统计误差, Δ_{other} 表示其他不确定因素对 CO₂ 统计不确定度的贡献。由于信号起伏特性符合泊松分布^[16], $\delta P_{\text{CO}_2,k}$, $\delta P_{\text{N}_2,k}$ 可近似表示为 $P_{\text{CO}_2,k}^{1/2}$, $P_{\text{N}_2,k}^{1/2}$ 。CO₂ 混合比的统计不确定度可进一步转化为

$$\frac{\delta q_k}{q_k} = (P_{\text{CO}_2,k}^{-1} + P_{\text{N}_2,k}^{-1} + \Delta_{\text{other}})^{1/2}, \quad (5)$$

由(5)式可以看出,CO₂ 混合比统计不确定度随着信号的减弱而增强,有必要通过分析处理数据使得 CO₂ 混合比统计不确定度不随距离而变化,并且使得 CO₂ 混合比统计不确定度在探测精度满足的范围内。

在计算机中贮存的 $P_{\text{CO}_2,k}$, $P_{\text{N}_2,k}$ 是连续回波信号 $R_A(z)$ 在第 k 空间间隔内的累加值,在这段间隔内(30 m)可认为 $R_A(z)$ 是一个与 z 无关的常量,在空间间隔 $(z_{i,k}, z_{f,k})$ 内 $R_A(z)$ 可表示为

$$R_A(z) = P_{A,k} / \Delta z, z_{i,k} < z < z_{f,k}, \quad (6)$$

$R_A(z)$ 的空间累加值可以写为

$$I_A(z_{i,m}, z_{f,n}) = \int_{z_m}^{z_n} R_A(z) dz, \quad (7)$$

离散形式可表示为

$$I_A(z_{i,m}, z_{f,n}) = \sum_{k=m}^n P_{A,k} = \sum_{k=m}^n R_A(z_k) \Delta z, \quad (8)$$

由于 $P_{A,k}$ 正比于在 $(z_{i,k}, z_{f,k})$ 间隔内待测气体撞击光电倍增管的光子数,那么 $I_A(z_{i,m}, z_{f,n})$ 则正比于在 $(z_{i,m}, z_{f,n})$ 间隔内待测气体撞击光电倍增管的光子数。

$I_A(z_m, z_n)$ 的统计不确定度可以用 $\delta P_{A,k}$ 表

示为

$$\delta I_A(z_{i,m}, z_{f,n}) = \left[\sum_{k=m}^n (\delta P_{A,k})^2 \right]^{1/2}, \quad (9)$$

信号的相对不确定度可以表示为

$$\frac{\delta I_A(r_{i,m}, r_{f,n})}{I_A(r_{i,m}, r_{f,n})} = \frac{\left[\sum_{k=m}^n (\delta P_{A,k})^2 \right]^{1/2}}{I_A(r_{i,m}, r_{f,n})}. \quad (10)$$

由于信号起伏特性满足泊松分布, (10)式可表示为

$$\frac{\delta I_A(r_{i,m}, r_{f,n})}{I_A(r_{i,m}, r_{f,n})} = I_A(r_{i,m}, r_{f,n})^{-1/2} = \left(\sum_{k=m}^n P_{A,k} \right)^{-1/2}, \quad (11)$$

这样, 分别用 I_{CO_2} , I_{N_2} , δI_{CO_2} , δI_{N_2} 来替代 $P_{CO_2}(z)$, $P_{N_2}(z)$, $\delta P_{CO_2}(z)$, $\delta P_{N_2}(z)$, (3)式, (4)式可分别表示为

$$q(z) = C_w \frac{I_{CO_2}(z_{min}, z_{max})}{I_{N_2}(z_{min}, z_{max})} \times \exp \left\{ \int_{z_0}^z [\alpha_{CO_2}(z) - \alpha_{N_2}(z)] dz \right\}, \quad (12)$$

$$\frac{\delta q(z)}{q(z)} = \left\{ \left[\frac{\delta I_{CO_2}(z_{min}, z_{max})}{I_{CO_2}(z_{min}, z_{max})} \right]^2 + \left[\frac{\delta I_{N_2}(z_{min}, z_{max})}{I_{N_2}(z_{min}, z_{max})} \right]^2 + \Delta_{other}^2 \right\}^{1/2}, \quad (13)$$

由(11)式, (13)式可转化为

$$\frac{\delta q(z)}{q(z)} = \left[\left(\sum_{k=m}^n P_{CO_2,k} \right)^{-1} + \left(\sum_{k=m}^n P_{N_2,k} \right)^{-1} + \Delta_{other}^2 \right]^{1/2}. \quad (14)$$

由(14)式可知, 在假定 Δ_{other} 为零的情况下, 在不同的高度范围内通过选取不同的累积点数, 可使得 CO_2 混合比的统计不确定性达到探测需要的精度, 传统的数据处理方法如移动平滑滤波得到的是在相同的分辨率下不同的统计误差, 这种方法是在不同的分辨率下可得到大致相同的统计误差, 也可以分段处理, 在每一段上统计误差是相同的, 并且具有比较高的空间分辨率。

4 数据处理

采集到的 CO_2 和 N_2 后向散射拉曼信号通常选取 21~24 km 内的光子数累积平均值作为背景噪声扣除, 如图 1, 2 分别为扣除背景后的 CO_2 和 N_2 拉曼信号。由图可以看出, N_2 拉曼信号要比 CO_2 拉曼信号平滑得多。为了保证较高的空间分辨率, 采取了分段滤波的方法, 使得在所分段空间内 CO_2 测量的统计误差大致是一个常数。通常情况下, 设

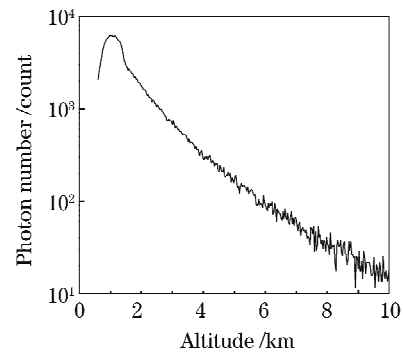


图 1 扣除背景噪声后 CO_2 的拉曼回波信号
Fig. 1 Atmospheric CO_2 Raman backscattering signal after deducting background noise

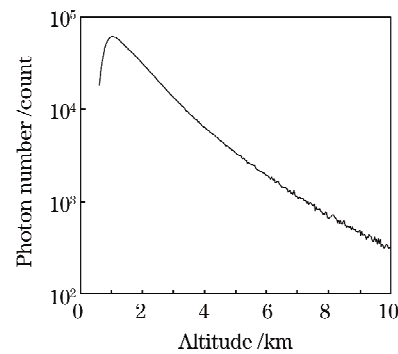


图 2 扣除背景噪声后 N_2 的拉曼回波信号
Fig. 2 Atmospheric N_2 Raman backscattering signal after deducting background noise

定 5 km 以下最大统计误差为 2.5%, 5~8 km 最大统计误差为 5%, 8~10 km 最大统计误差为 10%。图 3, 4 分别为 CO_2 和 N_2 拉曼回波信号经过分段自适应滤波器滤波后的信号。由于采取分段手段, 信号经过自适应滤波器滤波后呈阶梯型下降趋势。图 5 为 CO_2 和 N_2 拉曼信号经滤波器滤波后的空间分辨率。最小的空间分辨率为采集信号的空间分辨率。为了使空间分辨率保持在 350 m 以内, 采用分段的自适应滤波器。在设定某一最大 CO_2 测量的统计误差的前提下, 随着信号的减弱, 空间分辨率变得越来越低, 为了使空间分辨率不至于过低, 当空间分辨率上升到接近 350 m 时, 抬高设定的最大 CO_2 测量的统计误差(这里采取扩大 1 倍的方法)。空间内信号累加实际上相当于增加发射的激光脉冲数, 因此, 在 CO_2 探测实验过程中, 在保持一定 CO_2 测量统计误差的情况下, 增加发射的激光脉冲数, 会提高空间分辨率。若激光脉冲数增加到原来的 2 倍, 将会使 0.6~2.75 km 内的空间分辨率达到采集空间分辨率 0.03 km, 并且使得 2.75~10 km 内的空间分辨率提高到原来空间分辨率的 1/2。

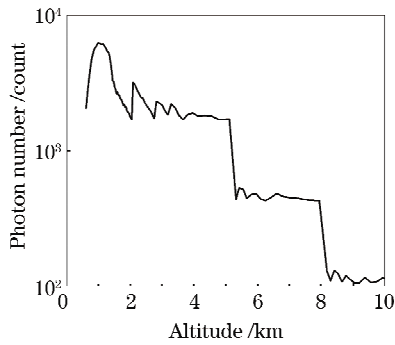


图 3 滤波后 CO₂ 的拉曼回波信号

Fig. 3 Filtered atmospheric CO₂ Raman backscattering signal

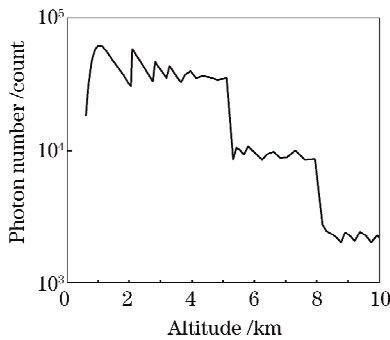


图 4 滤波后 N₂ 的拉曼回波信号

Fig. 4 Filtered atmospheric N₂ Raman backscattering signal

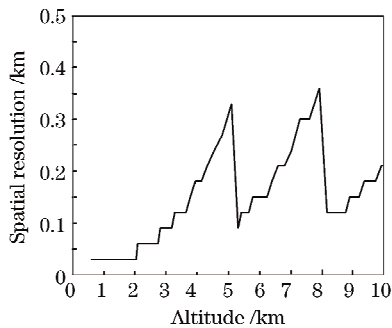


图 5 滤波后 CO₂ 混合比空间分辨率随高度的变化曲线

Fig. 5 Spatial resolution of the filtered atmospheric CO₂ mixing ratio as a function of height

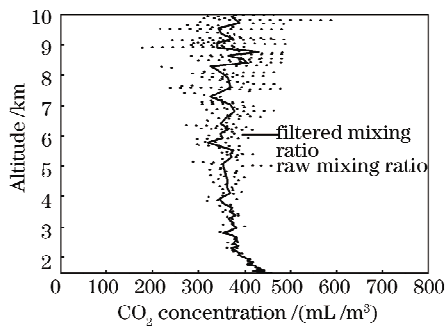


图 6 滤波前后 CO₂ 的混合比垂直廓线

Fig. 6 Raw and filtered atmospheric CO₂ vertical mixing ratio

图 6 所示为自适应滤波器滤波前后 CO₂ 的混合比垂直廓线对比图。滤波前 CO₂ 的混合比垂直廓线抖动很大,如芒刺状,经过自适应滤波器滤波后 CO₂ 混合比廓线起伏不大,芒刺状消失。

如图 7(a)所示,在滤波前 CO₂ 统计误差比较大,并且随着探测距离的增加,统计误差也在增加,到 10 km 处达到了 100%,经过自适应滤波器滤波后 CO₂ 混合比能够达到比较高的探测精度。正如图 7(b)所示,在设定的各个空间间隔内,如在 1.5~5 km,统计误差最大为 2.5%,在 5~8 km 内,统计误差最大为 5%,在 8~10 km 内,统计误差最大为 10%。在各个设定的空间间隔内,统计误差并不随着距离而增加,而是大致为一个常数。

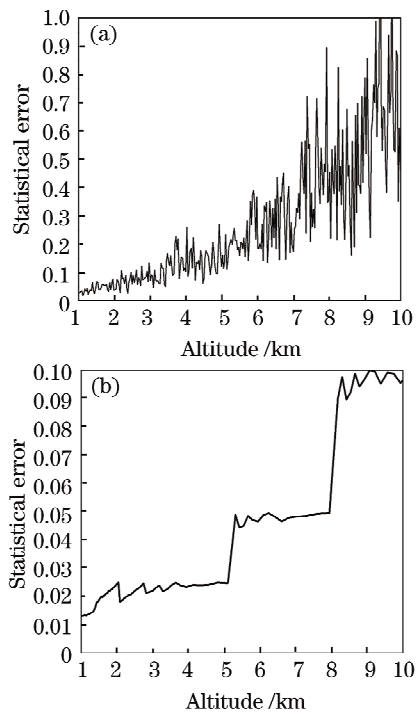


图 7 滤波前(a)后(b)CO₂ 垂直混合比廓线统计误差

Fig. 7 Statistical error of the raw (a) and filtered (b) atmospheric CO₂ vertical mixing ratio

5 结 论

CO₂ 探测实验中采集到的拉曼回波信号具有比较大的统计误差,经过自适应滤波器分段数据处理后,在设定的空间间隔内可得到几乎统一不变的统计误差,使得 CO₂ 浓度测量实验得到比较高的探测精度。利用此技术也可以量化估计在比较高的空间分辨率下满足探测精度要求的激光脉冲数。

参 考 文 献

- 1 G. J. Koch, B. W. Barnes, Mulugeta Petros *et al.*. Coherent differential absorption lidar measurements of CO₂ [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(26): 5092~5099
- 2 E. Dufour, F. M. Breon. Spaceborne estimate of atmospheric CO₂ column by use of the differential absorption method: error analysis [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(18): 3595~3609
- 3 S. A. Vay, J.-H. Woo, B. E. Anderson *et al.*. Influence of regional-scale anthropogenic emissions on CO₂ distribution over the western north pacific [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(D20): 22
- 4 W. S. Heaps. Measurement of carbon dioxide column via space borne laser absorption [C]. *SPIE*, 2007, **6750**: 67500V
- 5 F. Gibert, P. H. Flamant, D. Bruneau *et al.*. Two-micrometer heterodyne differential absorption lidar measurements of the atmospheric CO₂ mixing ratio in the boundary layer [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **45**(18): 4448~4458
- 6 Hong Guanglie, Zhang Yinchao, Zhao Yuefeng *et al.*. Raman lidar for profiling atmospheric CO₂ [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(2): 983~987
洪光烈, 张寅超, 赵曰峰等. 探测大气中 CO₂ 的拉曼激光雷达 [J]. *物理学报*, 2006, **55**(2): 983~987
- 7 Zhao Yuefeng, Zhang Yinchao, Hong Guanglie *et al.*. Scheme on acquisition and disposal for Raman lidar system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 734~738
赵曰峰, 张寅超, 洪光烈等. 拉曼激光雷达信号采集及处理系统 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 734~738
- 8 Peitao Zhao, Yinchao Zhang, Lian Wang *et al.*. Measurement of tropospheric CO₂ and aerosol extinction profiles with Raman lidar [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(3): 157~160
- 9 Zhaoyan Liu, William Hunt, Mark Vaughan *et al.*. Estimating random errors due to shot noise in backscatter lidar observations [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(18): 4437~4447
- 10 Hunxing Hu, Xiaobin Wang, Yonghua Wu *et al.*. Geometrical form factor determination with Raman backscattering signals [J]. *Optic Lett.*, 2005, **30**(14): 1879~1881
- 11 P. L. Fuehrer, C. A. Friehe, T. S. Iristov *et al.*. Statistical-uncertainty-based adaptive filtering of lidar signals [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(5): 850~859
- 12 D. N. Whiteman, S. H. Melfi, R. A. Ferrave. Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the earth's atmosphere [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(16): 3068~3082
- 13 T. Tolton, D. Plouffe. Sensitivity of radiometric measurements of the atmospheric CO₂ column from space [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(9): 1305~1313
- 14 Li Tao, Qi Fudi, Yue Guming *et al.*. Raman lidar system for the measurement of water vapor mixing ratio in the atmosphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, **24**(6): 843~854
李陶, 戚福第, 岳古明等. 大气中水汽混合比的 Raman 激光雷达探测 [J]. *大气科学*, 2000, **24**(6): 843~854
- 15 Yasuhiro Sasano. Tropospheric aerosol extinction coefficient profiles derived from scanning lidar measurements over Tsukuba, Japan, from 1990 to 1993 [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(24): 4941~4952
- 16 P. B. Russell, T. J. Swisler, M. D. McCormick. Methodology for error analysis and simulation of lidar aerosol measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(22): 3783~3797