

doi: 10.3788/gzxb20124110.1135

基于差分吸收激光雷达的云消除算法研究

范广强, 刘建国, 张天舒, 董云升, 赵雪松, 陆亦怀, 刘文清

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘 要:差分吸收激光雷达测量臭氧浓度过程中, 云层信号会造成对流层臭氧浓度剧烈的抖动, 带来了很大的测量误差. 本文提出了一种云消除算法, 该算法通过插值云层高度区域内的臭氧浓度, 有效消除了对流层臭氧浓度的剧烈抖动. 通过阐述其理论基础, 给出了其算法关键点, 即云信号的识别和云高度的精确定位. 根据云层消光系数的特点, 通过设定气溶胶消光系数阈值获取云层高度信息, 利用累加平均有效减少噪音造成的测量误差. 结果表明, 在精确确定云高、云底的基础上, 运用线性插值算法对臭氧测量结果进行修正, 可以有效克服云层对测量结果造成的急剧起伏.

关键词:差分吸收激光雷达; 云消除技术; Fernald 方法; 双波长差分吸收; 云层高度

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)10-1135-5

0 引言

对流层臭氧是对流层大气氧化性的重要标识物. 臭氧在太阳光照射下产生 OH 自由基, OH 自由基是大气光化学作用的助燃剂, 消除了大部分如 NO₂、SO₂ 等大气污染物. 对流层臭氧也是一种重要的温室气体^[1-2], 在大气辐射平衡中担负着重要作用. 对流层臭氧的来源和形成机制已成为研究的热点问题.

差分吸收激光雷达系统(Differential Absorption Lidar, DIAL)作为一种高时空分辨的监测仪器, 能够实时在线监测对流层臭氧的时空分布, 成为一种有效的监测对流层臭氧的高准确度仪器^[3-5], 为研究对流层臭氧的来源和形成机制提供了可靠的数据保障, 是研究对流层臭氧的有效监测工具.

在 DIAL 测量臭氧实验中, 云信号的出现产生了很大的测量误差, 影响了 DIAL 的测量准确度. 本文针对此情况, 根据云层回波信号特征, 对云层信号加以自动识别, 将其视为臭氧浓度测量中的奇点加以扣除, 算法中的关键点是云层信号高度的确定. 对云层高度的反演算法主要有微分零交叉法^[6]、阈值法^[7]等. 微分零交叉法是对回波信号微分, 两次过零点分别对应云底和云峰, Shiv R. Pal 根据经验给出了确定云顶高度的经验公式. 在实际的大气环境中, 气溶胶颗粒物的分布呈现空间的非均匀性, 原始回波信号微分的过零点也相应会有很多, 并且在距离

激光雷达的远端信号由于信噪比降低, 由于噪音的影响也会出现过零点. 阈值法是对距离平方修正后的信号设定一定的阈值, 将气溶胶和云层区分开来. 但是, 阈值是一个经验值, 随天气状况和污染状况而变化, 在带有云层的大量信号处理中, 不利于云层高度的识别. 本文使用 Fernald 方法^[8-10]首先计算出气溶胶的消光系数, 然后根据云层消光系数的特点, 设定阈值确定云层高度信息. 虽然 Fernald 方法在计算消光系数时有很多假设性的前提条件, 这给消光系数的计算带来了一定的误差, 但是由于云层与背景气溶胶消光系数间有显著的区别, 因此由此能够较为精确地定位云层的高度信息. 在识别出云层高度信息的基础上, 对比分析了插值采集信号以消除云层信号对测量臭氧的影响和插值臭氧浓度计算结果消除云层信号影响两种方法. 最后, 在实验中对对比分析了采用该算法前后的臭氧时空分布反演结果.

1 差分吸收激光雷达系统简介

实验中使用的 DIAL 系统是中科院安徽光学精密机械研究所自主研制开发的, 系统结构可靠, 稳定性高. 该系统可发射 266、289、299、316 nm 四波长的光束, 接收系统可分别测量 266、289、299、316 nm 波长的大气弹性后向散射信号. 激光器使用的是 Spectra Physics 生产的 LAB170-10 Nd:YAG 激光器, 激光器输出 266 nm 波长激光束, 输出能量为 90 mJ, 工作频率为 10 Hz. 266 nm 激光束由 45° 发

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2011YQ120024)、国家高技术研究发展计划(No. 2009AA06A311)和合肥物质研究院青年人才基金(No. Y03RC11122)资助

第一作者: 范广强(1982-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为激光雷达. Email: gqfan@aiofm.ac.cn

导师(通讯作者): 刘建国(1968-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为环境污染光学监测新技术、目标散射特性及遥感监测技术. Email: jgliu@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2012-04-25; **修回日期:** 2012-06-10

射镜和半反镜分成两束,分别进入 D₂、H₂ 喇曼管. 266 nm 激光束泵浦 D₂ 喇曼管,分别由一级 Stokes、二级 Stokes 作用,产生 289、316 nm 波长激光. 266 nm 激光束泵浦 H₂ 喇曼管,由一级 Stokes 产生 299 nm 波长激光. 剩余的 266 nm 波长激光和喇曼管产生的 289 nm、299 nm、316 nm 激光经过扩束镜发射到天空中. 光学接收系统的主要器件为接收望远镜、光谱仪、光电倍增管. 接收望远镜使用的是卡塞格林望远镜,望远镜主镜直径为 400 mm,焦距为 4 000 mm. 包含有臭氧吸收信息的弹性后向散射信号经接收望远镜接收后,经光谱仪分离出四个波长的信号并被光电倍增管转换为电流信号. 信号采集系统的主要器件是 Licel 记录仪,光电倍增管产生的电流信号由 Licel 记录仪采集并储存在工控机中.

2 云消除技术研究

2.1 云层回波信号特征

激光雷达回波信号 $P(r)$ 可用大气后向散射系数 $\beta(r)$ 、大气消光系数 $\alpha(r)$ 、高度 r 表示为^[11-12]

$$P(r) = C \frac{\beta(r)}{r^2} \exp \left[-2 \int_0^r \alpha(r') dr' \right] \quad (1)$$

式中, C 为仪器常量,大气后向散射系数 $\beta(r)$ 为气溶胶和空气分子的总后向散射系数,大气消光系数 $\alpha(r)$ 为气溶胶和空气分子的总消光系数.

将式(1)右端的 r^2 移到左端,得到

$$X(r) = P(r)r^2 = C\beta(r) \exp \left[-2 \int_0^r \alpha(r') dr' \right] \quad (2)$$

$X(r)$ 为激光雷达采集信号经过距离修正后的信号,在晴天条件下,式(2)中的 $\exp \left[-2 \int_0^r \alpha(r') dr' \right]$ 接近于 1,因此, $X(r)$ 与大气后向散射系数成正比. 2011 年 6 月 10 日,天气晴朗,有少量白云,图 1 为 2011 年 6 月 10 日 DIAL 采集得到的两组 289 nm 波长信号经距离的平方修正后的 $X(r)$. 两组采集的信号时间分辨率为 4 min,其中一组为含有云层的信号,另一组为不含云层的信号. 由于云层后向散射微分截

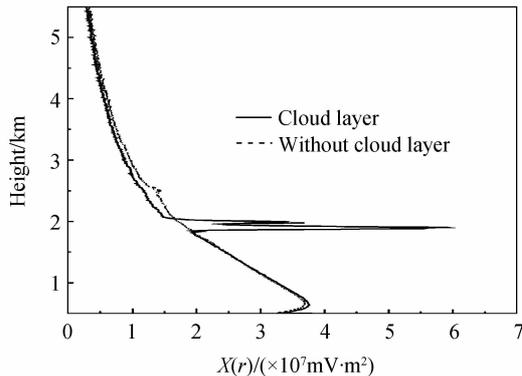


图 1 含有云层和不含云层的 $X(r)$
Fig. 1 $X(r)$ with cloud layer and without cloud layer

面远大于气溶胶,所以当激光在大气中传输遇到云时,激光雷达回波信号会迅速增大,出现一个突变的信号. 如图 1 所示,在 1 800~2 000 m 高度处,含有云层的信号的强度远高于周围的气溶胶回波信号及其不含云层的气溶胶回波信号. 云层的回波信号强度与周围的气溶胶回波信号有显著的区别,有其独特的特点:1) 云层回波信号强度大,脉冲宽度宽,在峰值信号两侧,回波信号单调变化. 2) 有些云层内部信号有所减弱,出现多个峰值,但这些峰值信号相距很近,这些云峰信号仍然属于同一云层.

2.2 双波长差分算法的大气修正的不足

DIAL 采用的是差分吸收技术原理,选取两个相近的激光波长,其中一束激光的波长位于待测气体的吸收线上,该波长计为 λ_{on} ,另一束激光的波长位于待测气体的吸收线外,计为 λ_{off} ,则可得 z 处待测气体的浓度表达式为^[13-14]

$$N(z) = -\frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dz} \left[\ln \frac{P(\lambda_{on}, z)}{P(\lambda_{off}, z)} \right] - B - E_A - E_M \quad (3)$$

式中

$$\Delta\sigma = \sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off}) \quad (4)$$

$$E_M = \frac{1}{\Delta\sigma} [\alpha_M(\lambda_{on}, z) - \alpha_M(\lambda_{off}, z)] \quad (5)$$

$$E_A = \frac{1}{\Delta\sigma} [\alpha_A(\lambda_{on}, z) - \alpha_A(\lambda_{off}, z)] \quad (6)$$

$$B = -\frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dz} \left[\ln \frac{\beta(\lambda_{on}, z)}{\beta(\lambda_{off}, z)} \right] \quad (7)$$

式中, $\sigma(\lambda)$ 为待测气体在波长为 λ 的吸收截面. E_M 、 E_A 、 B 为大气干扰项,其中 E_M 、 E_A 分别是由大气分子和大气气溶胶消光系数引起的, B 为大气(包括大气分子和气溶胶)后向散射系数引起的. 在对流层尤其边界层以下, E_M 、 E_A 、 B 大气修正项均不可忽略. 大气分子分布稳定, E_M 可以采用美国中纬度大气模式计算得到. 但是在计算 E_A 、 B 时由于气溶胶时空变化比较大,需要使用实时测量的气溶胶的消光系数和后向散射系数.

图 1 给出了含有云层的信号和不含云层的信号,图 2 给出了两种类型的信号反演得到的臭氧浓度廓线,差分距离选为 100 m. 以不含云层信号反演得到的臭氧浓度廓线为依据,可以看出在含有云层信号反演的臭氧浓度廓线中,在云层高度 1 800~2 000 m 处,云层信号引起了臭氧浓度高达 -68~263 ppb 的剧烈起伏. 含有云层信号反演的臭氧浓度经大气修正后的结果见图 2,可以看出,经过 E_M 、 E_A 、 B 大气修正项修正后有所改善,但仍存在较大的起伏,变化范围由 -8~154 ppb. 可见,大气修正项不能完全修正云层对测量结果的影响,需要采取云层消除技术,即视其为奇点,将其去除.

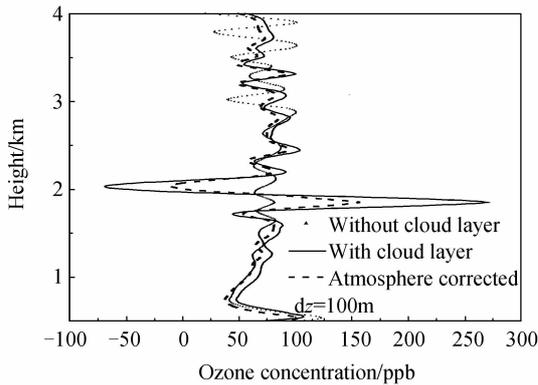


图2 臭氧浓度廓线
Fig.2 The ozone concentration profile

2.3 云消除算法

如何准确有效地提取云底、云高信息是 DIAL 云消除技术的关键. 云层的回波信号与周围气溶胶的回波信号有显著的区别, 同样, 云层的消光系数也与周围的气溶胶消光系数有很大的区别. 气溶胶的消光系数可通过 Fernald 方法获得, 图 3 为含有云层和不含云层信号反演得到的气溶胶消光系数, 以不含云层信号反演得到的气溶胶消光系数为依据, 可以看出, 在云层对应的高度上云层的消光系数远大于周围的气溶胶消光系数以及在同样高度上不同时刻, 不含云层信号反演得到的气溶胶消光系数. 云层的消光系数廓线出现双峰结构, 由于其距离相距很近, 认为是属于同一云层. 云层消光系数最大峰值达到了 1.43 km^{-1} , 在云层内部, 消光系数出现了谷值, 有些云层消光系数谷值甚至小于 0.3 km^{-1} . 因此, 在使用气溶胶消光系数判断云底和云高信息时, 气溶胶消光系数大于 0.3 km^{-1} , 且高度相距小于 1500 m 的云层认为是同一云层. 第一个气溶胶消光系数大于 0.3 km^{-1} 的值对应的高度为云底, 最后一个气溶胶消光系数大于 0.3 的对应的高度为云高. 若气溶胶消光系数大于 0.3 km^{-1} 并且高度相差大于 1500 m 是两层云信号, 识别为是质量较差的信号. 虽然差分吸收激光雷达采集信号时间分辨率高

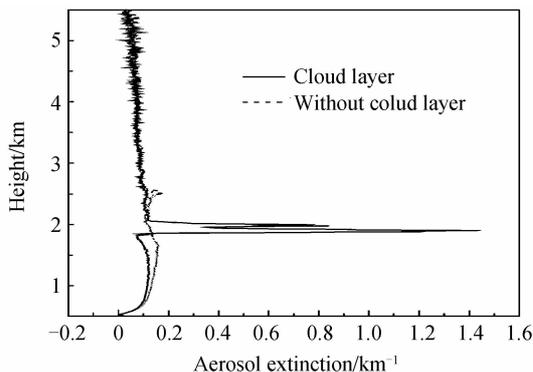


图3 气溶胶消光系数
Fig.3 The aerosol extinction coefficient

达 4 min , 通常累加平均 1 h 的测量结果以减少噪音引起的误差. 质量较差的信号反演得到的臭氧浓度起伏很大, 这与实际情况是不相符的, 在测量结果累加平均中将引入较大的测量误差. 因此, 在信号预处理中, 筛选掉质量较差的信号.

在准确确定云层高度信息后, 将云层信号视为奇点, 对其加以扣除. 本文计算分析了两种方法扣除云层的影响, 一种是在云层高度上, 对采集信号插值消除云信号的影响, 一种是对臭氧反演结果插值消除云信号的影响.

在精确确定云层高度后, 线性插值云高度区域内的信号. 使用插值后的信号反演的对流层臭氧浓度在一定程度上克服了云层带来的剧烈抖动, 但信号线性插值法却引入了新的抖动, 如图 4. 另一种方法是, 如果云层存在时间小于 1 h , 即在 1 h 内存在没有云层的信号, 由此信号反演得到的臭氧浓度代替云层高度区域内的臭氧浓度值; 如果云层存在时间较长, 大于 1 h , 在云层高度区域的臭氧浓度值用上下高度的臭氧浓度值插值获得, 如图 5. 由图中可以看出, 第二种方法有效克服了云层对测量结果带

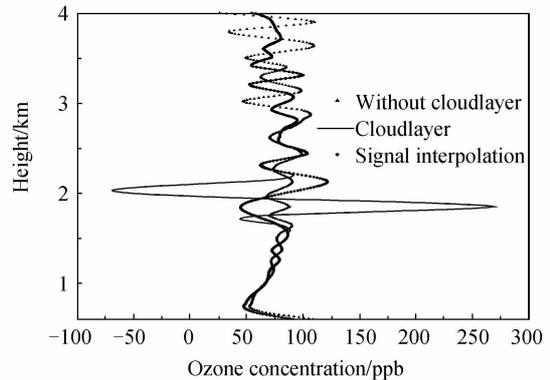


图4 含有云层信号在云层区域插值修正后反演得到的臭氧浓度廓线
Fig.4 The ozone concentration profile retrieved from the signal corrected by interpolation in cloudy region

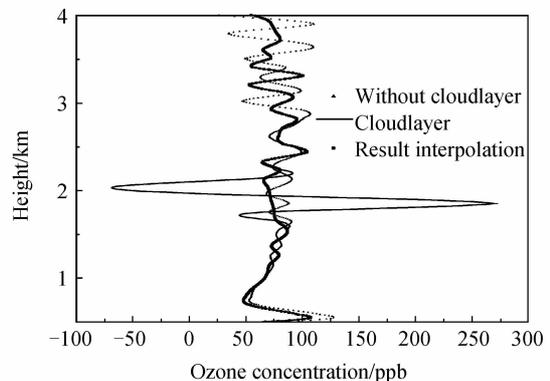


图5 含有云层信号反演得到的臭氧浓度廓线及在云层区域高度插值后的结果
Fig.5 The ozone concentration profile derived and its interpolation in cloud region

来的剧烈抖动。

3 实验结果

为了验证算法的有效性和可靠性,选取 2011 年 06 月 10 日一天 DIAL 测量的 289、299 nm 信号,使用该算法进行处理. DIAL 测量得到的 299 nm 回波信号,8:00,500 m 高度回波信号远大于不同时刻同样高度的信号强度和上下高度气溶胶回波信号的强度,并且随时间逐步抬升,图 6 为 Fernald 方法反演得到的气溶胶消光系数时空分布图,在回波信号幅值大的高度,其气溶胶消光系数大于 0.3 km^{-1} ,气溶胶消光系数远远大于不同时刻同样高度气溶胶的消光系数和上下高度的气溶胶消光系数,判断为云层. 云层在 16:00 达到峰值高度 3 000 m,由信号时空分布图可以看出,在云层较厚的情况下,云层高度以上的信号完全被背景噪音淹没,该算法判定这些信号为质量较差的信号,筛选掉不使用,从而保证算法反演对流层臭氧浓度的精确度.

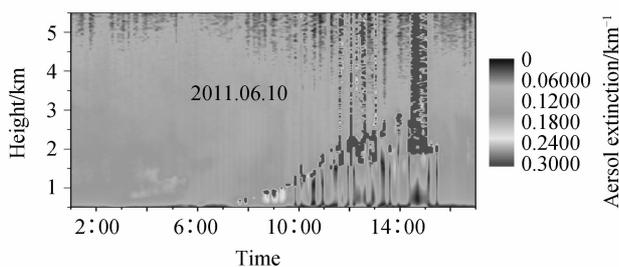


图 6 Fernald 方法反演得到的气溶胶消光系数时空变化
Fig. 6 The aerosol extinction temporal and spatial variation derived from Fernald method

将 1 h 测量的臭氧浓度累加平均,消除噪音的干扰.图 7 为 2011 年 06 月 10 日 1:00~17:00 对流层臭氧的时空分布图.应用云层消除技术前,如图 7(a),在云层出现高度内,对流层臭氧浓度出现了剧烈的起伏,起伏幅度由 $20 \sim 150 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间;使用该算法后,如图 7(b),消除了对流层臭氧浓度的剧烈起伏.实验结果表明,该算法可以精确确定云层高度,有效去除云层对对流层臭氧反演结果的影响.经云层消除技术应用后的对流层臭氧浓度时空变化图可以看出,1 km 以下有明显的日变化规律,夜晚臭氧浓度主要集中在 $20 \sim 30 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,下午臭氧浓度上升至 $80 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上.1 km 以上的臭氧浓度分布较为均匀,主要集中在 $70 \sim 80 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,昼夜变化不明显.

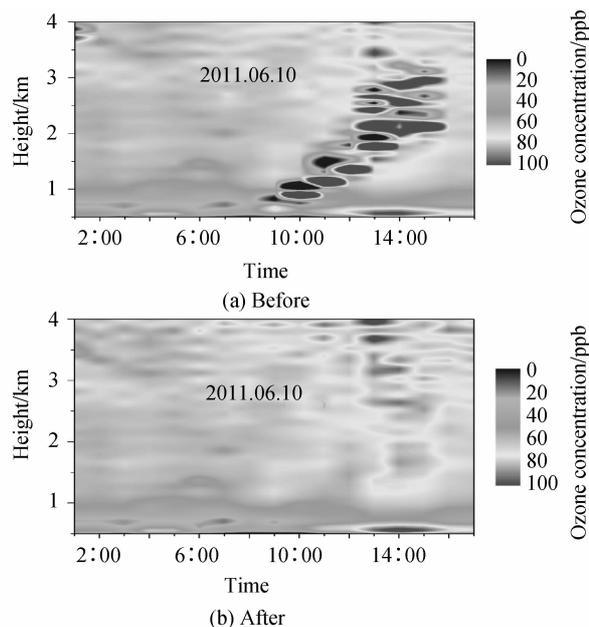


图 7 云层消除算法应用前后对流层臭氧时空分布图
Fig. 7 Tropospheric ozone concentration temporal and spatial variation before and after cloud layer elimination algorithm

4 结论

本文通过分析云回波信号的特点,根据 Fernald 方法反演得到的气溶胶消光系数信息,通过设定一定的阈值,得到云底、云高.在精确确定云高、云底的基础上运用插值算法对对流层臭氧反演结果进行修正,克服了云层造成测量结果的剧烈起伏,提高了测量的精确度.

参考文献

- [1] SHI Yu-zhen, WANG Geng-chen, XU Yong-fu. Simulation study of photochemical smog in Beijing urban and suburban areas[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2008, **13** (1): 84-92.
石玉珍,王庚辰,徐永福.北京市城近郊区光化学烟雾模拟研究[J]. *气候与环境研究*, 2008, **13**(1): 85-92.
- [2] LI Jie, WU Qi-zhong, GAO Chao, et al. Model study of ozone in the boundary layer over east asia in spring[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(1): 1-6.
李杰,吴其重,高超,等.东亚春季边界层臭氧的数值模拟研究[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(1): 1-6.
- [3] FUKUCHI T, FUJII T, CAO N, et al. Tropospheric O_3 measurement by simultaneous differential absorption lidar and null profiling and comparison with sonde measurement[J]. *2001 Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 2001, **40**(9): 1994-1949.
- [4] NAKAZATO M, NAGAI T, SAKAI T, et al. Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide[J]. *Applied Optics*, 2007, **46** (12): 2269-2279.

- [5] HU Shun-xing, HU Huan-ling, ZHOU Jun, *et al.* Dual-DIAL: a pair of wavelengths for high precise measurements of ozone[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **16**(2): 242-252.
- [6] PAL S R, STEINBRECHT W, CARSWELL A I. Automated method for lidar determination of cloud-base height and vertical extent[J]. *Applied Optics*, 1992, **31**(10): 1488-1494.
- [7] HAN Dao-wen, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, *et al.* Memorable glide window integral algorithm for retrieving cloud height[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2008, **20**(1): 1-5.
韩道文,刘文清,张玉钧,等. 用于反演云层高度的记忆式滑动窗口积分算法[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(1):1-5.
- [8] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments[J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(5): 652-653.
- [9] LIU Hou-tong, CHEN Liang-fu, SU Lin. Theoretical research of Fernald forward integration method for aerosol backscatter coefficient inversion of airborne atmosphere detecting lidar[J]. *Acta Phys Sin*, 2011, **60**(6): 064204-1-064204-9.
刘厚通,陈良富,苏林. Fernald 前向积分用于机载激光雷达气溶胶后向散射系数反演的理论研究[J]. *物理学报*, 2011, **60**(6):064204-1-064204-9.
- [10] TAO Zong-ming, WU De-cheng, LIU Dong, *et al.* Estimation of aerosol backscatter coefficient error in lidar data processing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(12): 1214001-1-1214001-5.
陶宗明,吴德成,刘东,等. 激光雷达反演气溶胶后向散射系数误差估算[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1214001-1-1214001-5.
- [11] FAN Guang-qiang, LIU Jian-guo, ZHANG Tian-shu, *et al.* Dual-channel polarization lidar monitoring of sandstorm and its transportation research[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(s114): 006-1-006-5.
范广强,刘建国,张天舒,等. 双通道偏振激光雷达监测沙尘暴污染及其输送研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(s114):006-1-006-5.
- [12] LIU Qiao-jun, ZHENG Yu-cheng, ZHU Jian-hua, *et al.* Ultraviolet Mie lidar observations of aerosol extinction in a dust storm case over Macao[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(3): 626-629.
刘巧军,郑玉臣,朱建华,等. 利用紫外 Mie 散射激光雷达探测澳门地区沙尘暴事件[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(3):626-629.
- [13] HU Shun-xing, HU Huan-ling, ZHANG Yin-chao, *et al.* Different absorption lidar for environmental SO₂ measurements[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, **31**(9): 1122-1126.
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):1122-1126.
- [14] TAO Zong-ming, CHEN Yu, CHU De-lin, *et al.* Atmospheric backscattering correction for ozone measurement with AML-2 mobile lidar[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, **3**(6): 401-406.
陶宗明,陈宇,褚德林,等. AML-2 车载激光雷达测量臭氧的大气后向散射系数修正方法研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2008, **3**(6):401-406.

A Cloud Elimination Algorithm Based on Differential Absorption Lidar

FAN Guang-qiang, LIU Jian-guo, LIU Wen-qing, LU Yi-huai, ZHANG Tian-shu,
DONG Yun-sheng, ZHAO Xue-song

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The cloud signals can cause severe wobble of tropospheric ozone concentration in the process of differential absorption lidar measurement of ozone concentration, and bring significant errors. A cloud elimination algorithm is presented. The algorithm effectively eliminate tropospheric ozone wobble by interpolating the ozone concentration in cloud height region. The key point of the cloud algorithm is given through expounding its theoretical basis. The key point of the cloud elimination is the discrimination of cloud signal and accurate positioning of the cloud height. The cloud height information is determined by setting the aerosol extinction coefficient threshold according to the characteristics of the cloud extinction coefficient. The cumulative average of retrieved ozone concentration reduces measurement errors caused by noise. The results show that the correction by interpolation algorithm of ozone measurements in cloud region could overcome the wobble of the ozone measurements caused by clouds.

Key words: Differential absorption lidar; Cloud elimination technique; Fernald method; Dual-wavelength differential absorption; Cloud height