

文章编号: 1007-5461(2006)03-0307-04

## 激光雷达测量大气气溶胶光学厚度方法研究

胡顺星, 王珍珠, 徐青山, 周 军, 胡欢陵

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

**摘 要:** 介绍一种激光雷达常数标定和气溶胶光学厚度 (AOD) 测量的新方法。利用太阳辐射计, 获得大气气溶胶的光学厚度, 激光雷达可以获得 35~40 km 高度的回波信号, 在这一高度区间可忽略气溶胶的存在, 大气模式可以提供大气分子散射系数, 根据激光雷达方程计算出激光雷达常数。反之, 标定激光雷达常数后, 根据激光雷达方程, 以激光雷达 35~40 km 的大气分子后向散射回波信号来确定气溶胶的光学厚度。激光雷达测量结果与太阳辐射计的测量结果一致性较好, 说明该方法是可行的。这种新方法既可以用于白天的气溶胶光学厚度测量, 也可以用于夜间测量。

**关键词:** 大气光学; 激光雷达; 气溶胶光学厚度; 太阳辐射计; 激光雷达常数

**中图分类号:** TN958.98      **文献标识码:** A

## 1 引 言

激光雷达是大气参数探测的有效手段之一<sup>[1,2]</sup>。激光雷达常数是激光雷达系统的一个重要参数, 它与激光雷达系统的许多参数有关。如果能够知道激光雷达常数参数, 可以给气溶胶光学厚度测量和数据处理带来许多好处。激光雷达测量气溶胶光学厚度的一般方法是利用 Fernald 方法求解气溶胶消光系数的高度分布<sup>[3,4]</sup>, 然后, 对消光系数求积分得到气溶胶光学厚度。激光雷达常数标定工作是一件繁琐或者比较困难的事情。据我们所知, 现只有三种实验方法可以用来确定激光雷达常数。一、选择晴朗、稳定、能见度极好的天气条件, 利用标准漫反射靶法进行标定; 二、利用粒子计数器得到气溶胶粒子谱分布和滤膜采样得到虚折射指数来计算大气后向散射系数, 消光系数和消光后向散射比来标定激光雷达常数<sup>[5]</sup>。三、在大气分子散射起主要作用, 气溶胶散射贡献极少的天气条件下, 计算激光雷达常数<sup>[6]</sup>。本文提出一种新方法, 用实验的方法确定激光雷达常数, 即激光雷达结合太阳辐射计的共同试验标定激光雷达常数。利用太阳辐射计获得多个波长的大气气溶胶光学厚度, 激光雷达可以获得 30 km 或更高高度 (假设此高度不含气溶胶) 的大气回波信号。激光雷达常数进行标定后, 可以用来求解气溶胶的光学厚度和整层大气气溶胶的平均消光后向散射比。

## 2 激光雷达常数标定

激光雷达探测的大气后向散射信号可由激光雷达方程表示为

$$P(z) = \frac{P_0 C \beta(z)}{z^2} \exp \left[ -2 \int_0^z \alpha(z) dz \right], \quad (1)$$

在这个方程中

$$\int_0^z \alpha(z) dz = \tau - \int_z^\infty \alpha(z) dz. \quad (2)$$

$\tau$  为整层大气的光学厚度, 在晴朗的白天时,  $\tau$  可由太阳辐射计测量及计算得到, 当高度  $z$  达到 35 km 以上时, 可忽略气溶胶的存在,  $\beta(z)$  只包含大气分子的后向散射,  $\int_0^z \alpha(z) dz$  和  $\beta(z)$  可由大气 (大气分子

**基金项目:** 863 计划激光技术领域资助课题

**收稿日期:** 2005-11-17

**E-mail:** sxhu@aiofm.ac.cn

和臭氧) 模式计算得到,  $P_0$  为发射激光束的平均单脉冲能量, 可由能量计测量得到。这样, 整个方程中只有激光雷达常数  $C$  未知, 求解激光雷达常数  $C$  成为可能。

### 3 气溶胶光学厚度的求解方法

如果确定了激光雷达常数, 从方程 (1) 可以知道, 利用 35~40 km 区间  $z$  高度的激光雷达回波信号确定的大气气溶胶光学厚度  $\tau_A(z)$

$$\tau_A(z) = -\frac{1}{2} \ln \left( \frac{P(z)z^2}{P_0 C \beta(z)} \right) - \int_0^z \alpha(z) dz, \quad (3)$$

在这个方程中,  $\alpha(z)$  为高度  $z$  处的大气分子消光系数 (包括大气分子散射和臭氧分子吸收)。

如果假设气溶胶消光 - 后向散射比  $S$  为常数, 那么,  $S$  可以用下式直接求出来,

$$S = \bar{C} [1 - T^2(z^*)] \left[ 2 \int_0^z \frac{P(z)z^2 dz}{P_0} \right]^{-1}. \quad (4)$$

其中,  $T(z^*)$  是从激光雷达所在位置到高度  $z^*$  的大气透过率。

### 4 太阳辐射计和激光雷达

研制的偏振激光雷达 (PML) 主要由激光发射单元、接收光学单元、信号探测和采集单元以及控制单元组成<sup>[7]</sup>。在激光雷达系统中, 使用了 Quantel Brilliant Nd:YAG 激光器 (10 Hz), 直径 254 mm 的 Schmidt-Cassegrain 型望远镜, 接收视场 1 mrad, Barr 公司中心波长 532 nm 带宽 3 A 的滤光片, Hamamatsu H7680/H7680-01 型光电倍增管, Phillips 777 型前置放大器, Gage1610 型 A/D 采集卡。PML 激光雷达可昼夜探测对流层气溶胶和云的消光系数和退偏振比垂直分布。

L625 激光雷达是一台测量大气臭氧, 气溶胶, 水汽和温度的复杂的系统<sup>[8]</sup>, 直径 625 mm 的 Cassegrain 型望远镜, 接收视场 2 mrad, 具有三个接收光学通道, 采用 EMI 的 9814QB 和 9817B 型光电倍增管, EG&G 的 VT120B 型前置放大器以及 EG&G 的 914p 型光子计数器。目前, 该系统只能用于夜晚的测量。

DTF-3 型便携式自动太阳辐射计是由安徽光机所研制的<sup>[9]</sup>。仪器主要由跟踪台、控制机箱和笔记本电脑组成, 自动温度控制。接受主计算机的命令实现转换滤光片、调整增益、定时采集和存储测量数据等各种功能。仪器采用四象限元件、步进电机和单片机控制实现主动式跟踪, 跟踪角精度  $\pm 1.5'$ 。分光系统采用八块干涉滤光片分光, 可测光谱范围为 380~1100 nm 同时可测 8 个波段, 带宽为 10 nm。经过系统标定的 DTF-3 型太阳辐射计, 通过测量 8 个波长的太阳直接辐射随太阳高度角的变化, 可以得到该 8 个波长精确的整层大气气溶胶光学厚度。

### 5 激光雷达常数的测量和分析

PML 激光雷达可以测量白天和夜晚的消光系数对流层气溶胶消光系数分布, 由于 PML 激光雷达探测系统探测能力的限制, 白天测量时, 30 km 以上信号已淹没在噪声中。PML 激光雷达测量一般采集 5000 个激光脉冲的回波, 然后求其每个激光脉冲的平均回波信号分布。如图 1 给出了 PML 激光雷达在 2005 年 6 月 30 日北京时间 9 时 50 分测量回波信号, 背景噪声已扣除, 30 km 以上的数据由于信噪比太低, 已被删除。但我们需要 35~40 km 的回波信号来计算激光雷达常数, 因此, 我们利用了 L625 激光雷达的回波信号来模拟 PML 激光雷达更高高度的回波信号, 即将 L625 激光雷达的回波信号乘某一系数  $\bar{d}$  后与对流层的信号在 14~17 km 区间进行拼接, 得到虚拟的回波信号。选择这一区间主要是保证 PML 信号足够高的信噪比。需要说明的是, L625 激光雷达只能用于夜晚测量, 无法得到白天的测量信号, 因此, 这对于我们来说是一个缺憾。但是, 从两个激光雷达信号的比值  $d(z)$  来看, 如图 2 所示,  $\bar{d}$  为  $d(z)$  在 14~17 km 区间的平均值, 比值  $d(z)$  围绕平均值  $\bar{d}$  波动, 说明平流层大气比较稳定, 虽然 L625 激光雷达与 PML 激光雷达

测量不同时, 但对我们的标定工作影响不大。PML 激光雷达的激光束能量为 150 mJ, 在 PML 激光雷达测量与 DTF-3 型便携式自动太阳辐射计测量同时进行。根据方程 (1), 我们可以得到 35~40 km 区间不同高度的  $C$  值分布, 如图 3 所示。然后, 求 35~40 km 区间的平均值, 即得激光雷达常数  $\bar{C}$  为  $163859 \text{ Sr}\cdot\text{km}^3$ 。图 4 给出了六次测量激光雷达常数的结果, 我们以多次测量的平均值作为 PML 激光雷达的标定常数平均值为  $163859 \text{ Sr}\cdot\text{km}^3$ 。各次测量的激光雷达常数与平均值的差别均小于 7%。

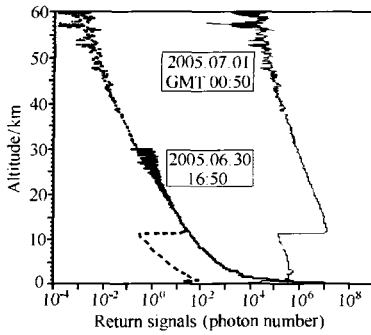


Fig.1 Real and simulation lidar return signals acquired by PML lidar and L625 lidar

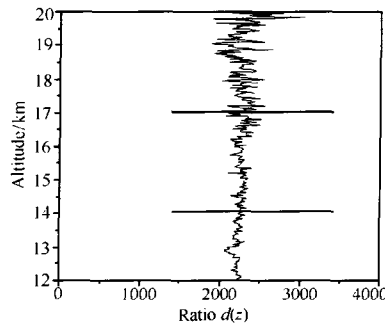


Fig.2 Ratio profile of return signals by L625 lidar and PML lidar during rang from 12 to 20km altitude

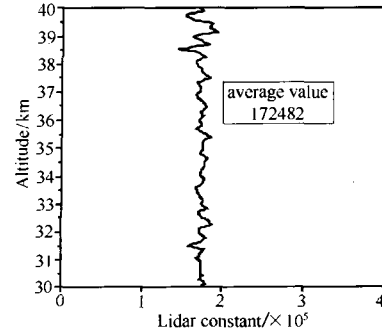


Fig.3 Distribution of lidar constant vs altitude calculated with simulation signals from 30 to 40km altitude

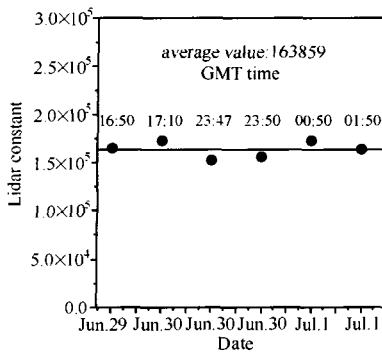


Fig.4 Six values of lidar constant measurements and their average value is 163859

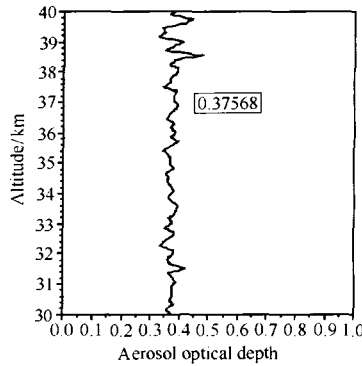


Fig.5 Distribution of AOD vs altitude calculated with simulation signals from 30 to 40km altitude, mean value is 0.37

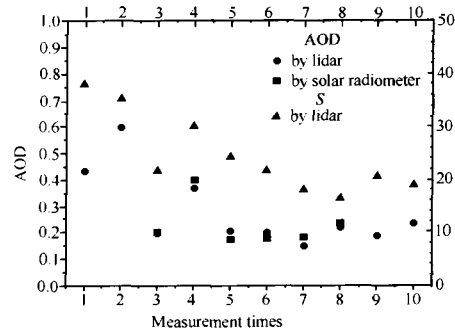


Fig.6 Comparisons of AOD measured by lidar and solar radiometer

确定了激光雷达常数后, 根据方程 (3), 利用 35~40 km 区间不同高度  $z$  计算的  $\tau_A(z)$  分布, 如图 5 所示, 然后, 求 35~40 km 区间  $\tau_A(z)$  的平均值, 即得激光雷达测量的大气气溶胶的光学厚度  $\bar{\tau}_A$ 。图 6 给出了激光雷达和太阳辐射计测量的气溶胶光学厚度结果以及激光雷达测量气溶胶消光后向散射比的平均值  $S$ , 表 1 给出测量时间和测量值, 比较结果表明, 两者之间符合的较好, 也说明我们提出的方法是可行的。

Table 1 AOD and S data measured by lidar and solar radiometer

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AOD(by lidar)	0.43	0.60	0.19	0.37	0.20	0.19	0.15	0.22	0.19	0.23
AOD(by solar radiometer)	night	night	0.20	0.40	0.17	0.18	0.18	0.23	night	night
$\bar{S}$ (by lidar)	38.0	35.2	21.8	30.0	24.3	21.8	18.1	16.5	20.5	19.0

## 6 结 论

本文中我们提出了利用太阳辐射计测量的气溶胶光学厚度来确定激光雷达常数的方法。在本文的测量例子中, 激光雷达常数的误差小于 7%。标定激光雷达常数后, 根据激光雷达方程, 以激光雷达 35~40 km

的大气分子后向散射回波信号来确定气溶胶的光学厚度。激光雷达测量结果与太阳辐射计的测量结果一致性较好,说明该方法是可行的。对激光雷达系数进行标定后,来求解气溶胶的光学厚度,具有明显的优点,因为我们的气溶胶光学厚度求解方法与低层回波信号无关,因此无需考虑激光雷达的盲区 and 过渡区以及气溶胶的消光后向散射比参数。这种方法既可以用于白天的气溶胶光学厚度测量,也可以用于夜间测量。

#### 参考文献:

- [1] Zhou Jun, Yue Guming, *et al.*, Two-wavelength Mie lidar for monitoring of tropospheric aerosol [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, 20(10): 1412-1417 (in Chinese).
- [2] Hu Shunxing, Hu Huanling, Wu Yonghua, *et al.*, L625 differential absorption lidar system for tropospheric ozone measurements [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2004, 24(5): 597-601 (in Chinese).
- [3] Frederrick G F. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments [J]. *Appl. Opt.*, 1984, 23: 652-653.
- [4] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. *Appl. Opt.*, 1981, 20: 211-220.
- [5] Zhang Jingbin, Hu Huanling. Lidar calibration: a new method [J]. *Appl. Opt.*, 1997, 36(6): 1235-1238.
- [6] Frederrick G F, Benjamin M H, John A R. Determination of aerosol height distribution by lidar [J]. *J Appl. Meteor.*, 1972, 11: 482-489.
- [7] Wang Zhenzhu, Zhou Jun, *et al.*, Cirrus cloud observed by polarization Mie lidar system at Hefei region [J]. *Jiangsu Meteorology*, 2005 supplement, 256-259 (in Chinese).
- [8] Hu Shunxing, Hu Huanling, Wu Yonghua, *et al.*, Atmospheric ozone measured by differential absorption lidar over Hefei [C] // *Proc. SPIE, Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring III* [M]. 2003, 4893: 473-479.
- [9] Zhan Jie, Tan Kun, Shao Shisheng, *et al.*, Potable autocontrol solar photometer [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronic* (量子电子学报), 2001, 18(6): 551-555 (in Chinese).

## Studies on methods for aerosol optical depth measurements by lidar

HU Shun-xing, WANG Zhen-zhu, XU Qing-shan, ZHOU Jun, HU Huan-ling

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

**Abstract:** A new method is presented to calibrate lidar constant. Atmospheric aerosol optical depths(AOD) were measured by solar radiometer and lidars were used to acquire backscattering signals from aerosol free-loading regions 35 to 40 km altitude. Atmospheric model provides molecular scattering coefficient. Lidar constant can be calculated according to lidar equation. After lidar constant was calibrated using solar radiometer, aerosol optical depth can be determined with lidar return signals from 35 to 40 km altitude according to lidar equation. A good agreement between lidar measurements and solar radiometer measurements shows that our method for AOD measured by lidar is feasible. This method can be used to measure AOD on daytime and nighttime.

**Key words:** atmospheric optics; lidar; aerosol optical depths; solar radiometer; lidar constant

**作者简介:** 胡顺星 (1966 -), 男, 副研究员, 2003 年 10 月在中国科学院安徽光学精密机械研究所获光学博士学位, 主要从事激光雷达技术和大气臭氧, 气溶胶, 温度, 水汽, 二氧化硫和二氧化氮等大气参数的激光雷达探测研究。现在安徽光学精密机械研究所大气光学重点实验室工作, 参与中国科技大学地球空间物理学院 Mie-Rayleigh-Na 荧光激光雷达研制项目。