

激光雷达常数的测量研究

曹开法^{1,2}, 汪少林^{1,2}, 王珍珠^{1,2}, 谢 军¹, 苏 嘉¹, 赵培涛¹, 胡顺星¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要:提出了一种新的激光雷达常数的确定方法。利用在大气气溶胶水平分布均匀的天气条件下, 在无几何因子影响的区域通过激光雷达消光后向散射比和美国大气模式的数值计算得到激光雷达常数。理论上分析了误差来源, 由激光雷达消光后向散射比引起最大的误差小于 12.27%。最后根据测量信号计算得到本系统激光雷达常数为 $600668.2 \text{ sr} \cdot \text{km}^3$, 其标准偏差小于 13%。不同时刻的测量结果显示了很好的一致性, 表明该方法是可行的。激光雷达常数的获取为评估激光系统以及激光雷达方程的参数反演带来的便利。

关键词:大气与海洋光学; 激光雷达常数; 激光雷达比; Mie 散射; 气溶胶

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

Study for Measurement of Lidar Constant

CAO Kai-fa^{1,2}, WANG Shao-lin^{1,2}, WANG Zhen-zhu^{1,2}, XIE Jun¹

SU Jia¹, ZHAO Pei-tao¹, HU Shun-xing¹

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 1125, Hefei 230031, China;

2. Graduate School of The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A new method is presented to determinate lidar constant. Under the condition of homogenous horizontal atmosphere, the lidar constant can be calculated with transcendent knowledge about lidar ratio and American atmospheric mode. The source of error is analyzed and the biggest relative error of lidar constant caused by lidar constant error is lower than 12.27% theoretically. Finally lidar constant determinated with lidar returning signal is $600668.2 \text{ sr} \cdot \text{km}^3$ and its standard deviation is lower than 13%. The good consistency of result in different time indicates the feasibility of the method. The achievement of lidar constant can be offer convenience for retrieve of aerosol in lidar equation and evaluation of lidar system.

Key words: atmospheric and ocean optics; lidar constant; lidar ratio; Mie scattering; aerosol

1 引 言

气溶胶是大气中重要的成分之一, 它的分布对于研究大气辐射和人类健康有着重要意义。激光雷达^[1-3]为高时空分辨率的气溶胶测量提供了有效手段。但是由激光雷达方程求解气溶胶粒子的光学特征, 还是需要很多假设条件。如果能够得到系统的激光雷达常数, 可以为激光雷达数据反演带来很多好处^[1]。激光雷达常数的确定是一项繁琐和困难的事情, 一般用实验方法来确定有绝对定标和相对

定标。F. F. Hall 等^[2]在天气情况下利用漫反射靶进行测量定标, 这种方法能够较准确地得到激光雷达常数值, 但是需要准确地测量大气透过率以及漫反射靶的反射率。Philip B. Russell 等^[3]假定在对流

基金项目: 国家 863 计划激光技术领域 (No. 2002AA135330) 资助课题。

作者简介: 曹开法 (1982 -), 男, 硕士研究生, 主要从事激光雷达系统研究。E-mail: kaifa@ah163.com

收稿日期: 2007-10-30

层顶附近,气溶胶粒子和大气分子散射比已知定出激光雷达常数,这种方法受到气溶胶时空分布的影响。HU Shun-xing 等^[1]提出利用太阳辐射计结合激光雷达可以得到误差小于7%的激光雷达常数。本文分析了在气溶胶水平分布均匀的情况下,可以利用激光雷达消光后向散射比(简称激光雷达比)和大气模式定出激光雷达常数,理论计算标准误差为12.27%。最后根据实际的激光雷达回波信号计算得到了激光雷达常数,标准误差为13%。用不同时刻的测量数据得到的结果一致性较好,显示了该方法的可行性。

2 计算方法

激光雷达接收到的回波功率^[4]可表示为:

$$P(z) = \frac{P_0 C_A O(z) [\beta_1(z) + \beta_2(z)]}{z^2} \cdot \exp\left[-2 \int_0^z [\alpha_1(z') + \alpha_2(z')] dz'\right] \quad (1)$$

式中, P_0 激光雷达发射功率; $P(z)$ 是距离 z 处的回波功率; C_A 为激光雷达常数; $O(z)$ 表示雷达几何因子; $\beta_1(z)$, $\beta_2(z)$ 分别是大气分子和气溶胶后向散射系数; $\alpha_1(z')$, $\alpha_2(z')$ 分别是大气分子和气溶胶消光系数。对式(1)作距离修正得:

$$X(z) = P_0 C_A O(z) [\beta_1(z) + \beta_2(z)] \cdot \exp\left\{-2 \int_0^z [\alpha_1(z') + \alpha_2(z')] \cdot dz'\right\} \quad (2)$$

对式(2)求对数得:

$$\ln(X(z)) = \ln(P_0 C_A) + \ln(O(z)) + \ln[\beta_1(z) + \beta_2(z)] - 2 \int_0^z [\alpha_1(z') + \alpha_2(z')] \cdot dz \quad (3)$$

对式(3)微分可得:

$$\frac{d \ln(X(z))}{dz} = \frac{d \ln(P_0 C_A)}{dz} + \frac{d \ln(O(z))}{dx} + \frac{d \ln[\beta_1(z) + \beta_2(z)]}{dx} - 2[\alpha_1(z) + \alpha_2(z)] \quad (4)$$

式中, $P_0 C_A$ 是常数,不随距离变化,所以第一项为0;几何因子表示的是激光雷达接收视场与发射激光束的发散角重叠的函数,相对于同轴和双轴激光雷达系统几何因子从近区0逐渐增大到1后在充满区一直保持为1。所以我们选取激光雷达充满区的信号,此时式(4)第二项为0;在大气充分混合的情况下大气水平分布均一(一般选取能见度较好的夜晚测量),这样式(4)第三项为0。这样可得大气水平气溶胶消光系数 α_H :

$$\alpha_H = -\frac{1}{2} \frac{d[\ln X(z)]}{dz} - \alpha_1 \quad (5)$$

大气分子消光系数 α_1 和后向散射系数 β_1 通过探空气球获得,也可以通过中纬度美国大气模式^[4]计算得出:

$$\begin{cases} \beta_1(z) = 1.54 \times 10^{-3} \left(\frac{532}{\lambda}\right)^4 \exp\left(-\frac{z}{7}\right) \\ \beta_2(z) = \left\{ 2.47 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{z}{2}\right) + 5.13 \times 10^{-6} \exp\left[-\frac{(z-20)^2}{6^2}\right] \right\} \left(\frac{532}{\lambda}\right) \end{cases} \quad (6)$$

气溶胶后向散射系数 β_2 通过式(5)求得的消光系数 α_H 和气溶胶消光散射比 S_2 的经验值求得。根据 Mie 散射理论^[5]气溶胶消光散射定义为:

$$S_2 = \frac{\alpha_2}{\beta_2} = \frac{\sum_{i=1}^M \int_0^\infty Q_{\text{Ext},i}(r, m_i, \lambda) \pi r^2 n_i(r) dr}{\sum_{i=1}^M \int_0^\infty Q_{\text{Back},i}(r, m_i, \lambda) \pi r^2 n_i(r) dr} \quad (7)$$

式中, Q_{Ext} , Q_{Back} 表示气溶胶消光和后向散射效率因子; r, m_i, λ 表示气溶胶粒子半径、折射率和激光波长; $n_i(r)$ 表示气溶胶粒子数密度。从表达式中可以看出气溶胶消光散射比与气溶胶折射率,谱分布和激光波长相关。研究表明, S_2 一般在分布在20~40之间^[6],我们这里取均值30。通过同时监测激光发射能量,即可由下式求得激光雷达常数:

$$C_A(s, z) = X(z) / P_0 (\beta_1(z) + \beta_2(z)) \cdot \exp\left[-2 \int_0^z \alpha(z') dz'\right] \quad (8)$$

在求得的激光雷达常数的距离分布曲线中选取比较平滑的一段平均即可求得激光雷达常数。根据标准误差传递公式^[7],激光雷达常数反演误差为:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\delta C_A}{C_A}\right)^2 &= \left(\frac{\partial C_A}{\partial S_2}\right)^2 \left(\frac{\delta S_2}{C_A}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_A}{\partial \alpha_1}\right)^2 \left(\frac{\delta \alpha_1}{C_A}\right)^2 + \\ &\left(\frac{\partial C_A}{\partial \beta_1}\right)^2 \left(\frac{\delta \beta_1}{C_A}\right)^2 = \left(\frac{\alpha_2 C_A}{S_2^2 \beta_1 + \alpha_2 S_2}\right)^2 \left(\frac{\delta S_2}{C_A}\right)^2 + \\ &4 \alpha_1^2 C_A^2 \left(\frac{\partial \alpha_1}{C_A}\right)^2 + \left(\frac{C_A}{\beta_1 + \beta_2}\right)^2 \left(\frac{\partial \beta_1}{C_A}\right)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

上式右边分别是气溶胶消光散射比 S_2 、大气分子消光系数 α_1 和大气分子后向散射系数 β_1 引起的误差。上式中第二项和第三项误差很小,可以忽略不计,误差主要来自于第一项。Q. S. He 等^[6]研究表明激光雷达消光后向散射比呈高斯分布的关系(如图1所示),均值在 (29.1 ± 5.8) sr。根据气溶胶

消光散射比 S_2 以及美国大气模式公式(6)可以计算得式(9)激光雷达常数的误差为 12.27%,实际上我们一般在气溶胶含量很小的天气状况下进行测量实验,这样气溶胶消光系数较小使得上式第一项误差更小。因此我们的计算方法可以得到相对误差小于 12.27% 的激光雷达常数。气溶胶消光后向散射比的测量值概率分布图如图 1 所示。

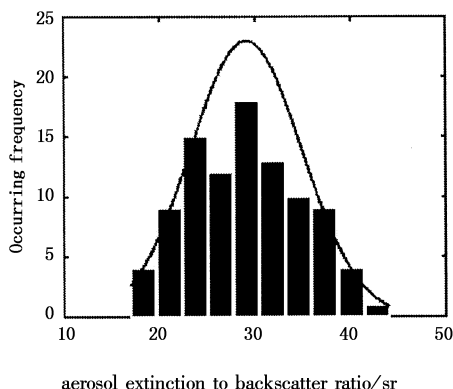


图1 气溶胶消光后向散射比的测量值概率分布图^[6]

Fig.1 frequency distribution of the aerosol extinction-to-backscatter ratio^[6]

3 车载式大气环境监测激光雷达系统^[8]

根据环保部门的应用需求,安徽光学精密机械研究所研制成功我国首台实用型车载大气环境监测激光雷达(AML-2),主要用于对流层下部尤其是大气边界层污染物(SO_2 , NO_2 , O_3 和 漂尘)的探测。该系统采用高压气体受激拉曼散射激光光源,整个系统装在中型客车上,便于野外测量。激光发射系统采用工业用 Nd:YAG 固体激光器,其倍频光 532nm 用于气溶胶消光系数测量。四倍频光 266nm 作为激发源,泵浦高压气体 CH_4 , D_2 和 H_2 产生的拉曼频移光来差分探测 O_3 和 SO_2 。三倍频光 355nm 用来泵浦 CH_4 和 D_2 产生拉曼频移光差分探测 NO_2 的分布阔线。激光光束经 6 倍扩束镜扩束准直后,由导光镜导向大气。接收系统主要由接收望远镜、小孔光阑、光纤、输出光准直器、超窄带、高光谱透过率滤光片滤波、光电倍增管和前置放大器。最后由 A/D 采集卡将模拟信号转化为数字信号存储在计算机中。系统具体参数如表 1 所示。在其焦平面上,放置不同直径大小的小孔光阑(视场角为 0.2 ~ 2.0mrad)起限制视场角的作用。系统采用了大口径、高精度三维空间扫描装置,它的水平扫描角度: $-180^\circ \sim +180^\circ$,垂直扫描角: $-5^\circ \sim +95^\circ$,角速度

大于 $5^\circ/\text{s}$ 。潜望式扫描镜的水平扫描和垂直扫描分别有零角度鉴别装置。因此我们可利用它进行上半天空的任意角度测量研究。本文就是利用系统 532nm 通道测量激光雷达常数,用三维扫描系统进行水平测量实验研究。系统结构示意图如图 2 所示。

表 1 车载激光雷达系统参数

Tab.1 the specification for mobile lidar system

Name of unit	Technical parameter
Nd:YAG Laser	Model:Brilliant B, Quantel Co.
	Pulse energy:300mJ@532 nm;
	Repetition rate:20 Hz;
	Angle of divergence:;<0.5 mrad
Telescope	Cassegrain: $\phi 300\text{mm}$
PMT	Model:9214B; Efficiency:25%
Amplifier	Model:Phillips 6954; Gain:20
A/D	10M, 16bit
Filter	CWL:532nm; FWHM:0.5nm
	T: >60%

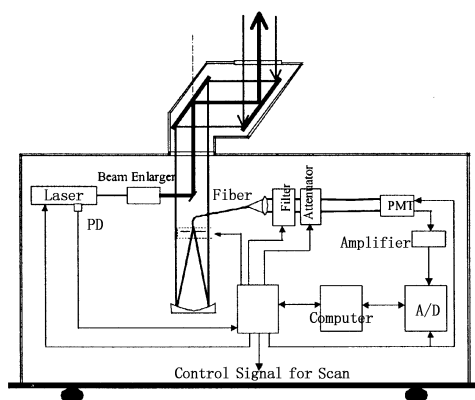


图2 车载激光雷达系统示意图

Fig.2 schematic of mobile lidar system

4 计算结果

我们 2005 年 9 月 7 号在北京通州区永乐店进行了水平测量研究。当时能见度很好,气溶胶含量很少。我们选取了白天和夜晚的两组数据,信号是 2000 次脉冲平均结果,如图 3 所示。同时测量了背景信号。我们先用测量的信号减去测量的背景信号,然后再减去选取 10 ~ 15km 区的信号平均值。然后利用上节所述的方法求解几何因子。分子消光系数和后向散射系数由式(6)计算得到,溶胶消光后向散射比用 30sr,图 4 是我们计算得到的激光雷达常数距离分布图。在(1.5 ~ 2.3) km 段由于大气

的波动较小,所以我们取这一段进行平均。两组不同时刻的激光雷达常数计算结果有比较好的一致性,说明了本方法的可行性。

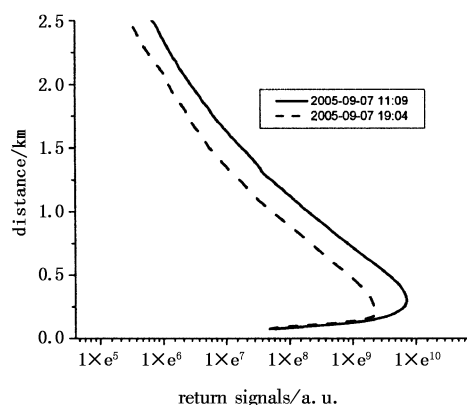


图3 激光雷达532nm处信号

Fig.3 signals of lidar at 532nm

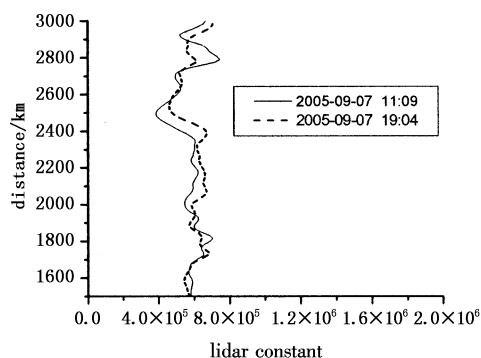


图4 水平信号计算得到的激光雷达常数距离分布图

Fig.4 distribution of lidar constant vs distance calculated with signal of horizontal direction

图5显示了使用不同的激光雷达比(20,25,30,35,40)计算得到的激光雷达常数。我们对1.5km~2.3km段进行平均,计算了不同激光雷达比计算得到的激光雷达常数的统计误差,数值如表2所示。计算得到的激光雷达常数平均值 $600668.2 \text{ sr} \cdot \text{km}^3$,由大气波动引起的标准偏差小于6%,激光雷达比的不确定性造成的标准偏差为13%。

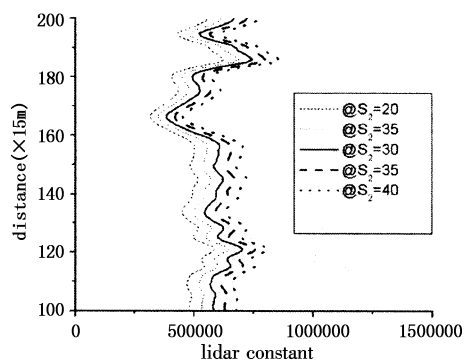


图5 使用不同的激光雷达比计算得到的激光雷达常数

Fig.5 lidar constant vs distance calculated with different lidar extinction-to-backscattering ratio

表2 激光雷达常数计算值以及统计误差值

Tab.2 the value and statistical error of lidar constant

LR	20	25	30	35	40
Lidar constant	499587	551932	602422	651161	698239
Statistical error	29763	32557	34876	37011	38977

4 结论

在大气均匀条件下可以通过激光雷达方程中一系列必要的简化,不需要借助其他仪器设备就可以计算激光雷达常数。计算中采用了激光雷达散射比和大气模式的先验知识进行求解。可以得到标准偏差小于13%的激光雷达常数。激光雷达常数的获取为评估激光系统以及激光雷达方程的参数反演带来的便利。

参考文献:

- [1] Hu Shun-xing, Wang Zhen-zhu, Xu Qing-shan, et. al. Studies on methods for aerosol optical depth measurements by lidar [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2006,23(3):305-310. (in Chinese)
- [2] Hall F F, Jr., Ageno H Y. Absolute calibration of a laser system for atmospheric probing [J]. Applied Optics, 1970,9(8):1820-1824.
- [3] Russel Philip B, Swissler Thomas J, McCormick M Patrick. Methodology for error analysis and simulation of lidar aerosol measurements [J]. Applied Optics, 1979, 18(22):3783-3797.
- [4] Liu Yu-li, Zhang Yin-chao, Su Jia, et al. Simulated signal calculation for rotational Raman lidar [J]. Chinese Journal of Light Scattering, 2006, 17(4):347-354. (in Chinese)
- [5] Sun Jin-qun. Laser atmospheric detection [M]. Beijing: Science Press, 1986. (in Chinese)
- [6] He Q S, Li C C, Mao J T, et al. A study on the aerosol extinction-to-backscatter ratio with combination of micro-pulse lidar and modis over Hongkong [J]. Atmos. Chem. Phys., 2006, 6:3243-3256.
- [7] Tao Zong-ming, Zhang Yin-chao, Cen Gang, et al. Estimating method of detecting minimum pollutant gas [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(5):602-604. (in Chinese)
- [8] Qu Kai-feng, Zhang Yin-chao, Tao Zong-ming et. al. Measurement of surface ozone with mobile lidar system [J]. Chinese journal of Quantum Electronics, 2006, 23(3):365-368. (in Chinese)