

激光雷达在沙尘暴观测中的应用——数据的解析及表述

董旭辉¹ 祁辉¹ 任立军¹ 王雁鹏¹ 狄一安¹ 陈岩¹
杉本伸夫² 坂本和彦³

1 国家环境分析测试中心 北京 100029

2 日本国立环境研究所

3 日本埼玉大学大学院

摘要 本文阐述了 NIES 型激光雷达的工作原理和主要工作参数,探讨了激光雷达方程在沙尘暴监测中的应用条件,对激光雷达所获取的各种信息进行处理,分别用光化学强度、后项散射强度、退偏振率、双波长校正等对沙尘天气进行了解析,进而用消光系数表示和计算在垂直方向沙尘浓度的分布;根据其在沙尘暴监测、大气环境监测等方面的实际应用,总结出适合于不同天气状况的解析方法和解析图形,并针对不同天气状态下的大气污染状况来源解析进行了尝试。

关键词 激光雷达 沙尘天气 消光系数 大气污染

1 前言

大气遥感技术分为主动式和被动式两种。被动式大气遥感技术主要依靠接受大气自身发射的红外光波或微波等辐射而实现对大气参数的探测。20 世纪 60 年代以来,人们将各种被动遥感仪安装在人造卫星上,以对地观测的方式对地球大气进行遥感探测从而开辟了大气遥感的一个新领域--卫星大气遥感,它被广泛应用于气象观测业务和大气科学研究中。

主动式大气遥感技术是由遥感探测仪器发出波束,此波束与大气物质相互作用而产生回波,通过检测回波而实现对大气的探测。由于主动式大气遥感探测仪器既要发射波束,又要接受回波,因此其机构比被动式大气探测仪要复杂,但探测能力相应要强得多。主动式大气探测仪器的代表是 20 世纪 40 年代发明的微波气象雷达和 60 年代发明的大气探测激光雷达。

微波气象雷达的工作波长在 1-100mm,反映的是大气中大尺寸粒子的情况。大气探测激光雷达的工作波长则在约 0.1-10 μ m,可与大气中原子、分子和粒子相互作用而产生回波,因此大气探测激光雷达正是本论文中所关注的。

激光雷达(LIDAR)是指以激光为光源的雷达系统,利用大气气溶胶、云等对激光的散射特性,测定其分布特征的观测手法,是现阶段获得大气气溶胶各光学性质、空间垂直分布以及相关信息的有效遥感技术^[1-4]。1960 年第一台激光器问世,仅时隔 3 年就发明了大气探测激光雷达。这说明激光雷达在大气探测方面有着独特的技术优势。1963 年美国 MIT 的菲奥科(Fiocco)等人首先使用 Mie 散射测定高层大气混浊度,同年利格达(Ligda)等人利用 Mie 散射激光雷达对对流层的气溶胶进行了观测。70 年代后半叶 Mie 散射激光雷达已进入了完全实用阶段。

2001 年 3 月为了配合国家环保总局重点科研项目“黄沙与沙尘暴对北京大气颗粒物影

响的研究”工作，在中日友好环保中心设置了连续监测的偏振光激光雷达系统（NIES 型激光雷达）^[5]。2003 年 11 月课题组在内蒙古的呼和浩特又设置了一台同型号的激光雷达进行连续观测。

本文优化了 NIES 型激光雷达的工作原理和主要工作参数，探讨了激光雷达方程在沙尘暴监测中的应用，对激光雷达所获取的各种信息进行处理，进而用消光系数表示和计算在垂直方向沙尘浓度的分布；根据其在沙尘暴监测、大气环境监测等方面的实际应用，总结出适合于不同天气状况的解析方法和解析图形，并针对不同天气状态下的大气污染状况来源解析进行了尝试。

2 NIES 型激光雷达的工作原理及主要工作参数

Mie-散射激光雷达测定大气气溶胶的原理及基本构造如图 1 所示。利用激光雷达观测大气气溶胶时，激光脉冲被发射到大气中，然后被大气气溶胶散射，后散射光被望远镜收集并作为时间的函数被检测。延迟时间与激光脉冲被散射的高度相对应，回波信号的功率与大气气溶胶的密度成正比。根据其观测结果，即可得到大气气溶胶的密度谱。

一般来说，激光雷达的灵敏度由发射光的能量和接收望远镜的直径决定的。记录仪的准确度以及检测器的特性都是决定灵敏度或信噪比的重要因素。然而，探测的优化条件依赖于激光雷达的应用。例如，在同温层观测，高能量和大直径的望远镜被用于收集很弱的散射光。在观测沙尘和空气污染物时，没有必要用高能量的激光和直径大的望远镜。

本研究使用的 NIES 型激光雷达与 Mie-散射激光雷达散射原理是相同的^[6,7]，其结构如图 2 所示。

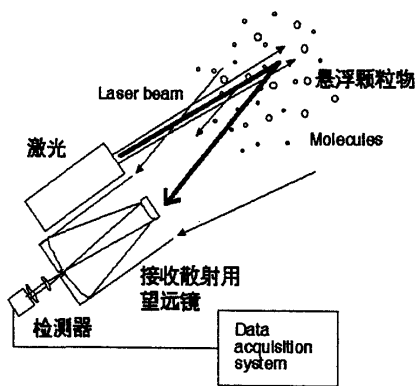


图 1 Mie-散射激光雷达散射原理图

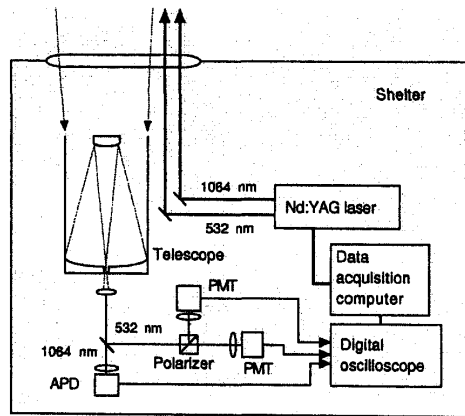


图 2 NIES 型激光雷达的主要构造

NIES 型散射激光雷达的一个功能是多波长测量，两种波长 1064nm 和 532nm 可以同时发射，激光束经过光束扩束器校准后被发射，散射光用直径为 20cm 的 Schmidt Cassegrain 望远镜接收。

它的一个新增功能是利用散射光偏振的变化测量退偏振量。具有退偏振量测定功能的

激光雷达称为偏振激光雷达。在测定退偏振量时，首先发射线性的偏振激光，反射回来的散射光（与发射方向平行的或垂直的）用两个独立的偏振组分元件分别进行吸收。如果偏振激光遇到纯球形的物质发生散射时，偏振将被保存，只有平行的组分被观测到。实际上大气颗粒物中的物质并不是完全的球形，其垂直组分也能被观测到，因此定义退偏振率为垂直组分与平行组分之比（Pr/P1）。非球形物质对偏振激光（例如沙尘）发生散射时，退偏振率是将其与近似球形物质区分的一个绝佳指标。通常，大气污染物气溶胶的退偏振率不大（小于10%），而沙尘的退偏振率较大（大于10%）。因此在本研究中用退偏振率来区分和确定球形大气污染物气溶胶和非球形的沙尘类物质。需要说明的是，水云有低的退偏振率，冰云有较高的退偏振率，在识别时须注意区分。

本研究使用的 NIES 型激光雷达的主要技术参数经优化选择后列于表 1。

表 1 NIES 型激光雷达的技术参数

激光器	闪光灯激励 Nd:YAG	
	输出功率	532nm 30mJ/脉冲 1064nm 20 mJ/脉冲
	脉冲重复率	10pps (典型情况)
望远镜	Schmidt Cassegrain	
	直径	20cm
	视场	1mrad
检测器	光电倍增二极管	532nm 双偏振器
数据获取	数字示波器	

3 激光雷达方程

激光雷达方程描述的是用激光雷达测量的信号。激光雷达方程是所有激光雷达方法的基础。激光雷达方程的简式如下^[8]：

$$P(R) = P_0 \eta_0 Y(R) \frac{ct_p}{2} A_R \frac{\beta(R)}{R^2} \exp[-2 \int_0^R \alpha(r) dr] \quad (1)$$

$P(R)$ ：激光雷达接收到高度为 R 时的回波信号功率，单位瓦特；

P_0 ：发射激光束的功率，单位瓦特；

η_0 ：激光雷达总的光学系数；

$Y(R)$ ：发射和接收系统的几何形成因子；

C ：光速；

t_p ：脉宽；

A_R ：接收器的收光面积；

$\beta(R)$ ：后散射系数，单位为 $m^{-1}sr^{-1}$ ，指气溶胶和分子总的后向散射；

$\alpha(r)$ ：消光系数；指散射光的消光系数。单位为 m^{-1} 。

用 Mie-散射激光雷达要测量的是后散射系数 $\beta(R)$ 和消光系数 $\alpha(r)$ ，在激光雷达测

量中,观测到的值是 $P(R)$ 。对于激光雷达系统而言, $Y(R)$ 和其它常数是已知的。因此,从激光雷达方程求 $\beta(R)$ 和 $\alpha(r)$ 是数据分析的关键。从方程(1)可知,在一个方程中有两个未知数,因此需要对方程进行一些假设。

Mie-散射激光雷达有多种数据分析方法。目前常用的方法是 Fernald's 和 Klett's 方法^[9]。两种方法对 $\beta(R)$ 和 $\alpha(r)$ 的关系都进行了假设。在 Fernald's 方法中,气溶胶的散射和分子的散射是不一样的,需要分别进行处理。 $\beta(R) = \beta_1(R) + \beta_2(R)$; $\alpha(R) = \alpha_1(R) + \alpha_2(R)$; 下标 1 表明气溶胶的 Mie-散射,下标 2 表明分子的 Rayleigh 散射。 $\beta(R)$ 和 $\alpha(r)$ 的线性关系如下:

$$\alpha_i = S_i \beta_i \quad (2)$$

$i=1$ 表示气溶胶; $i=2$ 表示分子。在 Rayleigh 散射中, $S_2 = 8\pi/3$, S_1 依赖于气溶胶的类型,它通常称为激光雷达比或是消光系数与后散射系数之比。在数据分析中, S_1 是很重要的参数。

根据雷达系数的假设,激光雷达方程可以写成一个未知数的方程。用无穷远作为临界值进行方程求解。在临界状态,我们需要给 β_1 的值,因为在无穷远处,大气气溶胶的密度很小,因此假定 $\beta_1=0$ 。

在 Klett 方法中, Mie 和 Rayleigh 的散射成分则为进行分别处理。一般来说,为了获得消光系数谱,气溶胶浓度较高(光学厚度大)时,用 Klett 法较好。而当气溶胶浓度低(光学厚度小)时,则 Fernald 法为佳。在 Fernald 方法中,当气溶胶浓度不是很高时,后散射系数的误差对 S_1 不是很敏感。当气溶胶密度很高时,消光系数的误差很小。应该说明的是, $\beta_1(R)$ 和 $\alpha_1(r)$ 的转化直接依赖着对 S_1 的假设。对城市空气污染物气溶胶来说, 532nm 处的 S_1 的值为 50; 对沙尘气溶胶来说, S_1 的值为 40-60, 巧合的是空气污染气溶胶与沙尘是很接近的。

4 激光雷达数据的解析

4.1 信号强度和信号的退偏振率

在 NIES 型激光雷达中,测量值分别是信号的强度和信号的退偏振率。将其进行数据分析以及计算机处理,其结果如图 3 所示。

由图 3 可知,横坐标表示时间,单位为天(day);纵坐标表示垂直高度,单位为千米(km)。修正信号强度定义为 $R^2 P(R)$, $P(R)$ 为信号强度。由激光雷达方程, $P(R)R^2$ 为:

$$P(R)R^2 = c_{\text{system}} \beta(R) \exp[-2 \int_0^R \alpha(r) dr] \quad (2)$$

消光项很小时, $P(R)R^2$ 近似正比于 $\beta(R)$ 。对于常数 c_{system} ,没有明确规定。该表示法的目的不仅仅是为了及时观测大气气溶胶状况,也是为了随时检验雷达系统的运行情况。

图 3 的上半部分为观察到气溶胶和云团的信号强度。一般来说,在同一海拔高度,云的散射要比气溶胶的散射强很多,可用这种差别可以区分云和气溶胶。另外云和气溶胶也能从时间变化进行区分。在相同时间段内,云的变化比气溶胶的变化大得多。由此判断出轮廓线圈出的为云,高度大多分布为 3km 以上。

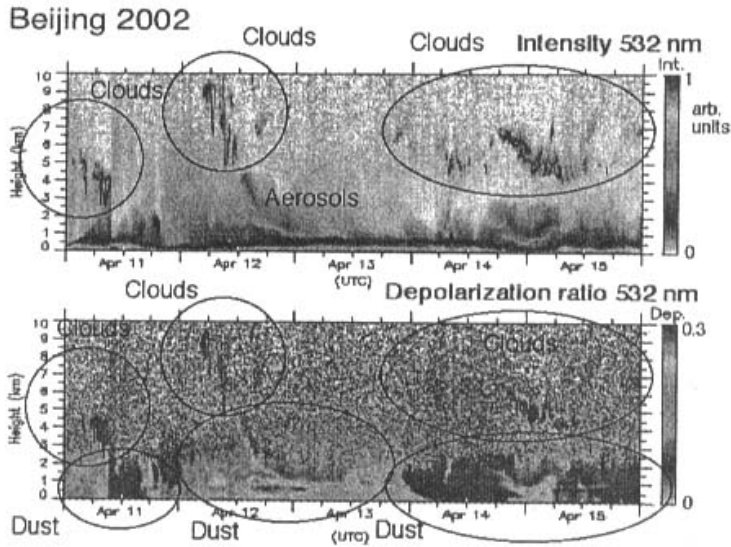


图 3 信号强度和信号退偏振率示意图

图 3 的下半部分为非球性散射物质（沙尘）的散射情况。云、水云中的小水滴都是球形的，所以它们的退偏振率很小，另一方面，冰云中的冰晶是非球形的，因此退偏振率很大。然而冰晶有时会排列在云中，在这种情况下，观察到的冰晶的退偏振率会比较低。对于气溶胶，空气污染气溶胶和海盐微粒是近似球形的，所以退偏振率较低。而沙尘有较高的退偏振率（大于 10%）。由图 3 的观测结果可以得知，轮廓线标出沙尘区域的退偏振率都大于 20%，个别区域的退偏振率甚至大于 30%，因此可以判断出该时间观测到的观察到大气气溶胶则多是沙尘，而观测到所有的云都是冰云。

4.2 双波长信号比

NIES 型激光雷达具有双波长，在处理后的显示图中，可以得到 1064 nm 和 532 nm 的信号比，其结果如图 4 所示。如果散射物质的直径比较大，如水云微粒（直径约 10 μm 或更大），双波长信号比 $P(1064)/P(532)$ 接近于 1。这是因为对直径大的颗粒，波长与散射的关系依赖性较小。气溶胶的双波长信号比较小（0.1 到~1.2）。一般来说，粒径越大，双波长信号比就越大。

由图 4 最下面部分可以看出，云的双波长信号 $P(1064)/P(532)$ 比值较大；从图 4 中间部分，还能看出大气边界层顶部（该层距离地面约 2 km）的气溶胶有较大的波长信号比值。这可能是因为在接近边界层顶部，空气相对湿度较大，气溶胶粒径更大的缘故。利用该激光雷达双波长的特点，在观测时不仅可以识别气溶胶颗粒的大小，而且可以识别不同高度、不同时间的沙尘颗粒的大小。即类似的双波长信号比轮廓图不仅适用于沙尘天气，也适用于重空气污染。

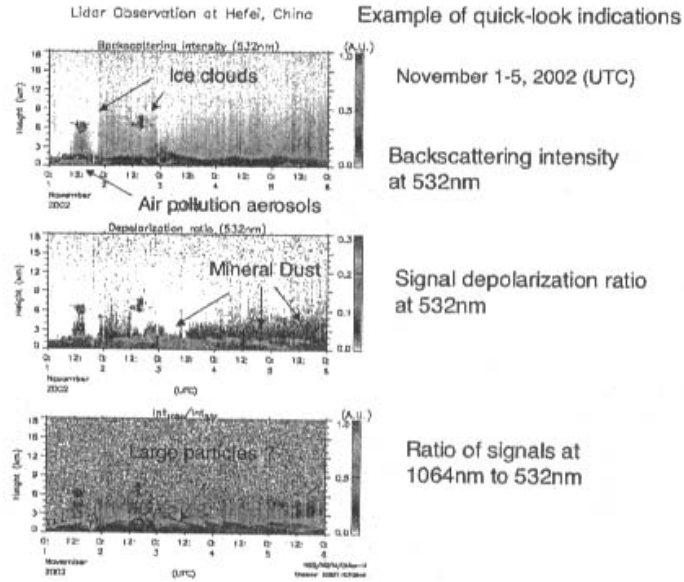


图4 高度修正后的信号强度、波长 532nm 的退偏振率、波长 1064nm 和波长 532nm 信号比

4.3 衰减的后向散射系数和消光系数

通过对激光雷达比率的假设，用 Fernald's 反演方法诱导消光系数；衰减的后向散射系数和区域修正信号相同，只是在近距离范围内进行了校准。它之所以称为衰减的后向散射系数，是因为激光雷达信号的衰减没有经过校正。我们用 Fernald's 反演方法得到的后向散射系数（消光系数）来校准近距离的后向散射系数。衰减的后向散射系数和消光系数的例子如图 5 所示。

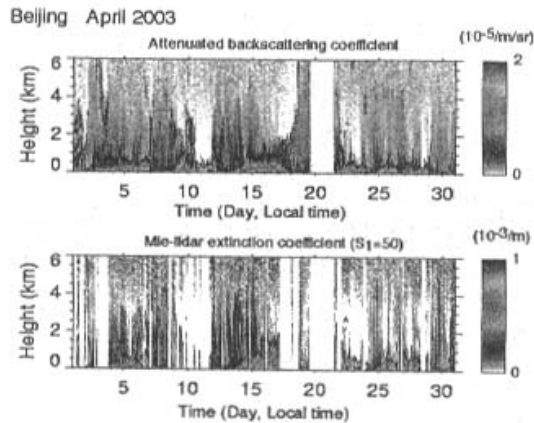


图5 衰减的后向散射系数和消光系数图

因为使用反演方法对信号衰减进行了修正,所以消光系数更加量化。但是,反演方法对于强云团散射有一定的局限性。事实上,图5的下半部分,一些数据就是因为这个问题丢失了。由于后向散射系数在更高的海拔高度上因为衰减容易被低估了,因而进行数据分析时要同时用后向散射系数和消光系数这两个量来达到目的。例如在气溶胶传输分析中,我们可以用衰减的后向散射系数以便不失去在云团存在下的传输特性;而在与模型进行定量比较和气溶胶分布的气候学分析时,我们就应采用消光系数值。

根据散射强度和退偏振率,将激光雷达观测到散射物质分为沙尘、球型气溶胶、水云和冰云等四类,进一步通过退偏振率的方法可分辨矿物尘埃和大气污染气溶胶的贡献。

5 总结与展望

本文对 NIES 型激光雷达独特的工作原理和以及观测信息进行了阐述和解析,对激光雷达方程在沙尘暴监测中应用时的应用条件进行了探讨。并列举说明了激光雷达观测沙尘、大气气溶胶、云等颗粒物在大气污染和检测方面的应用。

在今后的研究中我们将对激光雷达观测到散射物质进行分类。根据散射强度和退偏振率,将散射物质分为四类,分别为矿物尘埃、球型气溶胶、水云和冰云,进而对亚洲沙尘现象进行统计分析。另外利用定量的方法,估计矿物尘埃在散射中的分布状况,推算矿物尘埃和其他球形气溶胶(多数是大气污染气溶胶)的消光系数,从而达到把握各种大气污染物的污染特征的目的。

参 考 文 献

- [1] Klett, J. D., Stable analytical inversion solution for processing lidar returns, *Appl. Opt.*, 1981, 20: 211 – 220.
- [2] Chen, Y., H. Quan, X. Dong, N. Sugimoto, I. Matsui, and A. Shimizu: Continuous Measurement of Dust Aerosols with a Dual-Polarization Lidar in Beijing, *Proc. Nagasaki Workshop on Aerosol-Cloud Radiation Interaction and Asian Lidar Network*, Nagasaki University, Dec. 2001.
- [3] Browell, E. V., C. F. Butler, S. Ismail, P. A. Robinette, A. F. Carter, N. S. Higdon, O. B. Toon, M. R. Schoeber, and A. F. Tuck, Airborne lidar observations in the wintertime Arctic stratosphere: Polar stratosphere clouds. *Geophys. Res. Lett.*, 1990, 17: 385–388.
- [4] Measures, R.M. *Laser Remote Sensing*. John Wiley & Sons, New York., 1984.
- [5] 国家环保总局沙尘暴研究组.“黄沙与沙尘暴对北京大气颗粒物影响的研究”报告书.北京, 2001.
- [6] Dong Xuhui, Quan Hao, Chen Yan, Di Yian, Wang Yanpeng, Tang Li Sigimoto Nobuo, Nishikawa Masataka. Application of lidar to sandstorm observation. *Proceedings of China-Japan Joint Symposium on Environmental Chemistry*. 2004, pp.401-402.
- [7] Sugimoto, N., Uno, I., Nishikawa, M., Shimizu, A., Matsui, I., Dong, X., Chen, Y., Quan, H.. Record Heavy Asian Dust in Beijing in 2002: Observations and Model Analysis of Recent Events, *Geophys. Res. Lett.* 2003, 30 (12): 1640, doi:10.1029/2002GL016349.
- [8] Shimizu, A., N. Sugimoto, I. Matsui, K. Arao, I. Uno, T. Murayama, N. Kagawa, K. Aoki, A. Uchiyama, and A. Yamazaki. Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidar in China and Japan during ACE-Asia, *J. Geophys. Res.*, 2004, 109, D19S17, doi:10.1029/2002JD003253.
- [9] Fernald, F. G. Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments, *Appl. Opt.*, 1984, 23: 659-653.

Application of Lidar in Sandstorm Observation——Analysis and Demonstration of Lidar's Data

Dong Xuhui¹ Qi Hui¹ Ren Lijun¹ Wang Yanpeng¹ Di Yian¹ Chen Yan¹
Sigimoto Nobuo² Sakamoto Kazuhiko³

1 Sina-Japan Friendship Center for Environmental Protection, Beijing, China

2 National Institute for Environmental Studies, Japan

3 Saitama University, Japan

Abstract Lidar's working mechanism and main working parameters were expounded in this article. Also we discussed that in what condition the Lidar equation can be used in sand storm monitoring. Many different kind of information got from the Lidar, including photo-chemical intensity, backscattered intensity, depolarization ratio, dual-wavelength recification etc, were used to analyze the dust cloud climate. Extinction coefficient was used to calculate the distribution of dust concentration in the vertical direction. We found that analytical approach and graph should be changed if weather is changed, so we attempted to analyze air pollution under different weather condition and summarized the formula at the end of the article.

Keyword Lidar dust weather air pollution extinction coefficient