

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2012.04.001

大气光学

测量大气边界层高度的激光雷达数据 反演方法研究

王琳^{1,2}, 谢晨波^{*1}, 韩永³, 刘东¹, 魏合理¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院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 100049;
3 南京大学, 江苏 南京 210093)

摘要: 大气边界层与人类关系最为密切, 它的高度分布直接反映了近地面的大气状况。而今激光雷达已成为探测大气边界层时空演变特征的最有效手段, 但如何从大量的测量数据中精确提取大气边界层高度则成为限制其应用的主要问题。介绍了四种常用的大气边界层高度提取方法, 即梯度法、标准偏差法、曲线拟合法和小波协方差变换法, 并结合自行研制的偏振拉曼-米散射激光雷达的实测数据, 分别对四种方法的提取结果进行分析。结果表明: 四种方法各有优缺点, 梯度法、标准偏差法和小波协方差变换法比较相近, 准确性高但不稳定; 而曲线拟合法的稳定性好, 但提取结果相对折中。总体而言, 曲线拟合法更适用于大量数据的批处理运算。

关键词: 激光雷达; 大气边界层; 梯度法; 标准偏差法; 曲线拟合法; 小波协方差变换法

中图分类号: P404 **文献标识码:** A **文献编号:** 1673-6141(2012)04-0241-07

Comparison of Retrieval Methods of Planetary Boundary Layer Height from Lidar Data

WANG Lin^{1,2}, XIE Chen-bo¹, HAN Yong³, LIU Dong¹, WEI He-li¹

(1 Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine
Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3 Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: As the most closely related layer with human, the planetary boundary layer's height directly reflects the state of the atmosphere near the ground. Now the lidar has become the most effective tool to

收稿日期: 2012-04-17; 修改日期: 2012-04-19

基金项目: 国家自然科学基金 (41005014, 40805006), 中国科学院知识创新工程青年人才领域专项前沿项目, 中国科学院大气成分与光学重点实验室开放课题基金项目资助

* 通信联系人。 E-mail: cbxie@aiofm.ac.cn

observe the planetary boundary layer, but the retrieval of the planetary boundary layer height from a large number of measured data limited its application. Four kinds of commonly used methods, such as the gradient method, standard deviation method, fitting method and wavelet covariance transform method, are introduced and analyzed, with the continuously measured data of polarization-Raman-Mie scattering lidar. The results show that the four methods have their own advantages and disadvantages. The gradient method, the standard deviation method and the wavelet covariance transform method are similar and accurate in data process, but not stable. The fitting method has good stability, but its derivation is not so accurate relative to the three methods above. All in all, the fitting method is better to be used to process a large number of data.

Key words: lidar; planetary boundary layer; gradient method; standard deviation method; fitting method; wavelet covariance transform method

1 引言

大气边界层 (planetary boundary layer, PBL) 是指直接受地面影响的对流层部分, 响应地面作用的时间尺度为 1 h 或更短^[1]。它主要通过摩擦阻力、蒸发和蒸腾、热量输送、污染物排放以及影响气流变化的地形等与地面的作用形成。大气边界层是与人类关系最为密切的一层, 是由人类活动和各项生态环境构成的主要气层, 对它的研究与天气预报、环境保护和航空安全等密切相关。

当前, 激光雷达作为一种新型大气主动遥感探测工具, 已广泛应用于大气气溶胶和污染物、云等领域的测量与研究工作^[2-3]。激光雷达具有很高的时空分辨率, 可长时间连续自动工作, 因此可实时、连续测量大气边界层结构的时空分布。然而, 如何从大量的测量数据中精确提取出大气边界层高度信息, 成为激光雷达探测大气边界层的关键问题。为此, 本文利用最新研制的偏振拉曼-米散射激光雷达系统实际测量数据, 详细分析了四种常用的大气边界层高度提取方法, 即梯度法、标准偏差法、曲线拟合法和小波协方差变换法, 为进一步开发更适于激光雷达连续探测大气边界层高度的提取方法奠定了理论基础。

2 偏振拉曼-米散射激光雷达系统

偏振拉曼-米散射激光雷达系统是本所为中国气象科学研究院研制的最新产品, 主要用于对

流层城市污染物、沙尘等气溶胶粒子和云的连续自动观测。该系统采用 Nd:YAG 激光器的二倍频 532 nm 线偏振激光作为探测光源, 同时测量 607 nm 氮气分子拉曼散射信号, 532 nm 平行和垂直米散射信号, 可定量得到气溶胶和云粒子的消光系数、后向散射系数以及退偏振比等参数, 从而进一步分析它们的大小、形状和化学组成等微物理特性^[4-5]。图 1 给出了该系统的外观图。

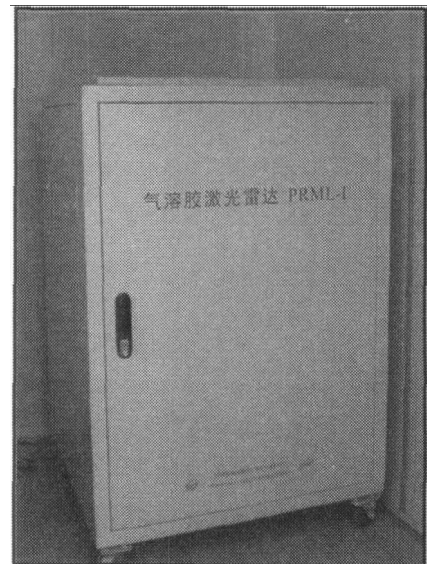


图 1 偏振拉曼-米散射激光雷达

Fig.1 Polarization-Raman-Mie lidar

3 大气边界层高度分布提取方法介绍

通常, 在大气边界层与上部的自由大气的交

界处存在一个逆温层^[6], 气象上即将该温度逆变高度定义为大气边界层高度。该逆温层将大量的气溶胶粒子束缚在逆温层内。而在逆温层上部的自由大气中, 气溶胶粒子浓度则很低。因此在大气边界层与自由大气交界处, 气溶胶粒子浓度减小得非常快, 反映在激光雷达回波信号上, 就是回波信号的快速衰减。由此, 通过查找这个衰减最快的高度, 就可以得到大气边界层的高度。

由激光雷达接收到的米散射回波信号变换可得激光雷达距离平方校正信号 $P(z)z^2$, 即

$$P(z)z^2 = P_0CY(z)[\beta_a(z) + \beta_m(z)]T_a^2(z)T_m^2(z) \quad (1)$$

$P(z)z^2$ 随高度的变化可直接反映出气溶胶粒子浓度的变化, 因此文中分析的四种激光雷达大气边界层高度提取方法均以此方程进行反演计算。

3.1 梯度法

梯度法^[7]是直接根据 $P(z)z^2$ 随高度衰减速率大小作为判断大气边界层高度的依据。定义梯度 $D(z)$

$$D(z) = d[P(z)z^2]/dz \quad (2)$$

这个梯度函数反映了 $P(z)z^2$ 在不同高度 z 处的衰减变化情况。大气边界层高度处于 $P(z)z^2$ 衰减最快的位置, 也就是 $D(z)$ 取得最小值的高度。梯度法简单方便, 但容易受到 $P(z)z^2$ 数据自身噪声和气溶胶层结构的干扰, 稳定性较差。因此, 在计算梯度 $D(z)$ 前必须对 $P(z)z^2$ 进行平滑处理, 而平滑点数 n 的选择无疑会影响梯度法提取大气边界层高度的结果。

3.2 标准偏差法

标准偏差法又称变量法^[8], 是利用一定高度范围内 $P(z)z^2$ 测量数据的离散程度来提取大气边界层高度。定义 $P(z)z^2$ 的标准偏差

$$STD(z) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [P(z)_i z^2 - \overline{P(z)z^2}]^2 \right\}^{1/2} \quad (3)$$

其中, N 表示求取偏差的点数。标准偏差 $STD(z)$ 反映了高度 z 处 $P(z)z^2$ 的离散情况, $STD(z)$ 数值

越大, 则 $P(z)z^2$ 的离散性越大, 即变化越剧烈, 故 $STD(z)$ 取得最大值的高度即大气边界层的高度。类似于梯度法, 标准偏差法也易受到 $P(z)z^2$ 数据自身噪声和气溶胶层结构的干扰, 并且求取偏差点数 N 的选取也将影响其提取结果。

3.3 曲线拟合法

曲线拟合法^[9]是通过构建一个曲线函数来拟合目标曲线, 即 $P(z)z^2$ 。当拟合曲线和 $P(z)z^2$ 曲线最为吻合时, 所对应的高度参数即为大气边界层高度。拟合函数定义为

$$F(z) = \frac{(F_m + F_u)}{2} - \frac{(F_m - F_u)}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{z - z_m}{s}\right) \quad (4)$$

其中, $\operatorname{erf}()$ 为误差函数

$$\operatorname{erf}(a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^a \exp(-y^2) dy \quad (5)$$

F_m 、 F_u 分别为混合层内和混合层以上区域 $P(z)z^2$ 的平均值, z_m 为混合层高度, s 与夹卷层厚度有关。这四个变量的值由拟合函数曲线 $F(z)$ 与实测 $P(z)z^2$ 之间的最小均方误差来确定。当均方误差最小时, $F(z)$ 与 $P(z)z^2$ 最为接近, 此时对应的 z_m 值即为大气边界层高度。其中, F_m 的数值(对应高度 h 以下 $P(z)z^2$ 的平均值)变化对曲线拟合效果影响较大。

3.4 小波协方差变换法

小波协方差变换是一种用于探测信号阶跃变化的方法^[10]。它基于一个复合阶跃函数 - 哈尔函数 $h()$, 定义为

$$h\left(\frac{z-b}{a}\right) = \begin{cases} +1, & b - \frac{a}{2} \leq z \leq b \\ -1, & b \leq z \leq b + \frac{a}{2} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中, z 是高度, b 是哈尔函数的中心位置, 而 a 则是哈尔函数的尺度间隔。

小波协方差变换函数 $W_f()$ 的定义为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{a} \int_{z_b}^{z_t} f(z) h\left(\frac{z-b}{a}\right) dz \quad (7)$$

其中, $f(z)$ 是信号函数, 在此即 $P(z)z^2$; z_t , z_b 分别是信号高度的上限和下限。小波协方差变换函

数 $W_f(a, b)$ 反映的是 b 高度 $\pm a/2$ 范围内 $P(z)z^2$ 信号与哈尔函数的相似程度。 $W_f(a, b)$ 越大, 就说明 $f(z)$ 信号函数与哈尔函数越相似, 即其阶跃变化越明显, 由此可知 $W_f(a, b)$ 取得最大值的高度, 即为大气边界层高度。对于离散信号, (7) 式可化简为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{n\Delta z} \left[\sum_{b-\frac{a}{2}}^b f(z)\Delta z - \sum_b^{b+\frac{a}{2}} f(z)\Delta z \right] = \frac{1}{n} \left[\sum_{b-\frac{a}{2}}^b f(z) - \sum_b^{b+\frac{a}{2}} f(z) \right], \quad (8)$$

其中, $a = n\Delta z, n=2,4,6,8, \dots$ 。 $\Delta z = 7.5 \text{ m}$, 为该激光雷达系统的空间分辨率。尺度间隔 a 的选择会影响大气边界层高度提取最终结果。

4 大气边界层高度分布提取方法分析

针对上文介绍的四种常用激光雷达大气边界层高度提取方法, 本节将从仿真计算、个例分析、敏感度分析和连续测量分析四方面对其进行研究和讨论。

4.1 仿真计算

根据理想情况下激光雷达信号进行仿真计算, 如图 2 所示。图 2(a) 是理想情况激光雷达距离平方校正模拟信号 $P(z)z^2$, 对应的大气边界层高度为 1 km, 如图中横线所示。图 2(b)~(e) 分别给出采用梯度法、标准偏差法、曲线拟合法和小波协方差变换法所得 $D(z)$ 、 $STD(z)$ 、 $F(z)$ 和 $W_f(z)$ 廓线。四种提取方法得到的大气边界层高度和模拟中对应的高度均一致, 说明四种方法都能够准确查找到大气边界层的高度。

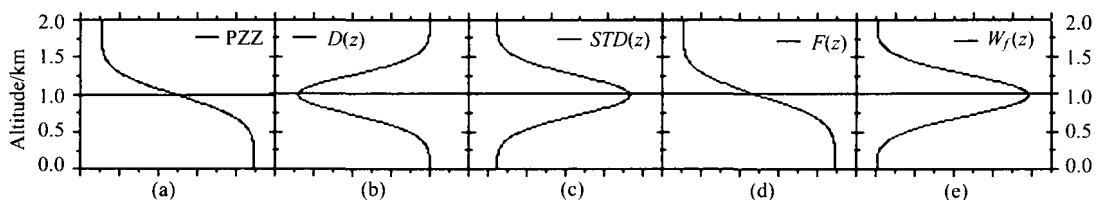


图 2 仿真计算中四种方法分析结果

Fig.2 Simulation results with four methods

4.2 个例分析

在实际激光雷达测量中, 由于大气结构十分复杂, 且测量信号自身还有噪声干扰, 因此大气边界层提取并不像理想情况中那么简单。下面将从实际激光雷达测量中常见的两种典型状况对四种方法提取效果进行分析。

为使四种方法能够统一比较, 数据分析中梯度法 $n=15$, 标准偏差法 $N=15$, 曲线拟合法中 F_m 为 $0\sim 0.5 \text{ km}$ ($h=0.5 \text{ km}$) 平均值, 小波协方差变换法中 $a=0.225 \text{ km}$ 。

4.2.1 近似理想状况个例分析

近似理想状况是指大气状况较为稳定, 无明显气溶胶结构层干扰。图 3 给出了此时 $P(z)z^2$ (粗线) 和四种提取方法对应的函数曲线 (细线) 以及获取的大气边界层高度 (水平线)。不难看出, 在总体形状上近似理想状况下的激光雷达距离平方校正信号和模拟信号相似, 但由于噪声的影响, 四种方法计算的大气边界层高度分别为 0.91 km 、 0.92 km 、 0.92 km 、 0.91 km , 它们的标准偏差为 0.57% , 最大偏差为 0.01 km 。

4.2.2 结构干扰状况个例分析

结构干扰状况是指在大气中存在气溶胶层结构干扰状况。图 4 给出了此时激光雷达距离平方校正信号和四种方法分析结果。图中显示, 在 1.3 km 附近凸出了一个明显的气溶胶层小结构, 在其干扰下, 梯度法、标准偏差法、曲线拟合法和小波协方差变换法得到的大气边界层高度出现较大差别, 分别为 1.37 km 、 1.33 km 、 1.04 km 、 1.03 km , 它们的标准偏差达到了 18.26% , 最大偏差达 0.34 km 。

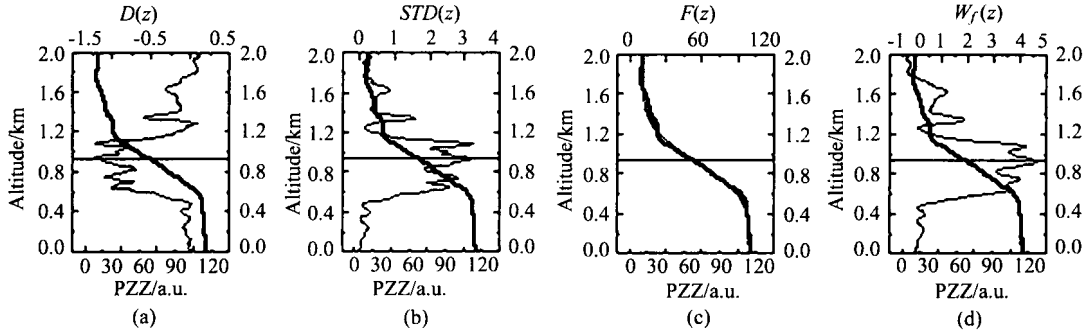


图 3 近似理想状况下四种方法个例分析结果

Fig.3 Practical results of an approximate ideal case with four methods

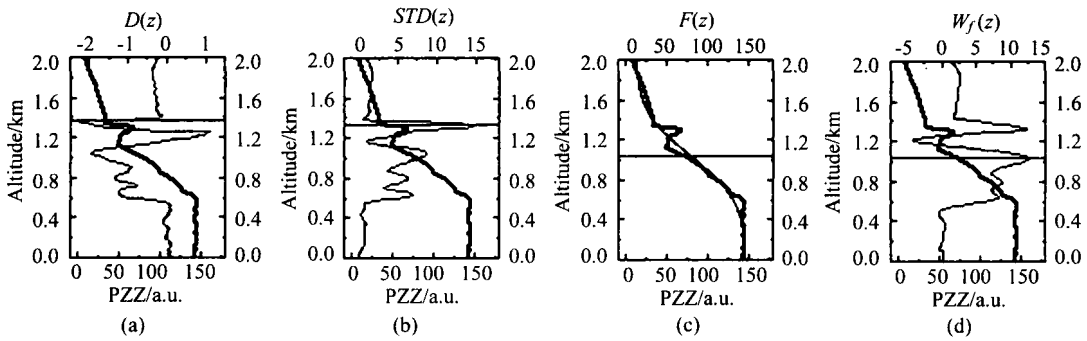


图 4 结构干扰状况下四种方法分析结果

Fig.4 Practical results of an unstable case with four methods

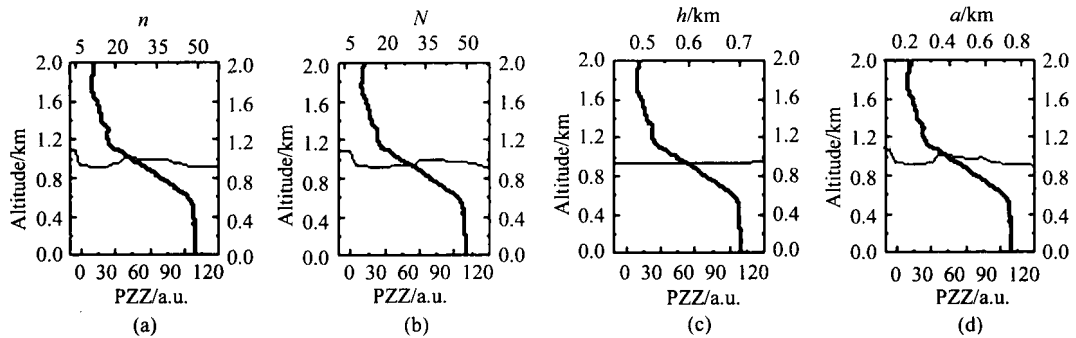


图 5 近似理想状况下四种方法敏感度分析结果

Fig.5 Sensitive analysis of an approximate ideal case with four methods

4.3 敏感度分析

在四种提取方法介绍中已经说明其各自参数的选取会对提取结果有所影响,下面将结合上述两种典型实际个例对四种提取方法的敏感度进行逐一分析。梯度法、标准偏差法、曲线拟合法和小波协方差变换法对应的输入变量选取范围分别

为: $n = 3 \sim 59$, $N = 3 \sim 59$, $h = 0.45 \sim 0.75$ km, $a = 0.15 \sim 0.885$ km。

4.3.1 近似理想状况敏感度分析

图 5 给出了近似理想状况下四种提取方法的敏感度分析结果,其中粗线为 $P(z)z^2$,细线为不同输入参数对应的大气边界层高度值。由图可知,

梯度法、标准偏差法和小波协方差变换法提取的大气边界层高度会随着输入参数的变大而呈现先降后升，最终趋于稳定的共同特征。而曲线拟合法则很稳定，基本不受输入参数的影响。

4.3.2 结构干扰状况敏感度分析

图 6 给出了结构干扰状况下四种提取方法的敏感度分析结果。由于受到 1.3 km 处气溶胶层结构的影响，梯度法、标准偏差法和小波协方差变换法提取的大气边界层高度在输入参数变化范围内都有一个相差约 0.3 km 的较大突变，而曲线拟合法受到气溶胶层结构的影响很小，提取的大气边界层高度较为稳定。

4.4 连续测量分析

为进一步分析四种方法对于激光雷达连续测量数据提取大气边界层高度的能力，图 7 给出激光雷达实际测量的一天连续回波信号时空分布(色图)及其四种提取方法得到的大气边界层高度(点划线)。

梯度法、标准偏差法、曲线拟合法和小波协方差变换法的输入参数分别为 $n = 25$, $N = 25$, $h = 0.5$ km, $a = 0.375$ km。对比结果显示，四种方法均能够从激光雷达连续测量数据中提取出大气边界层高度，但在细节上提取结果仍然有较大差别。总体而言，四种方法均可用于大气边界层高度的提取。

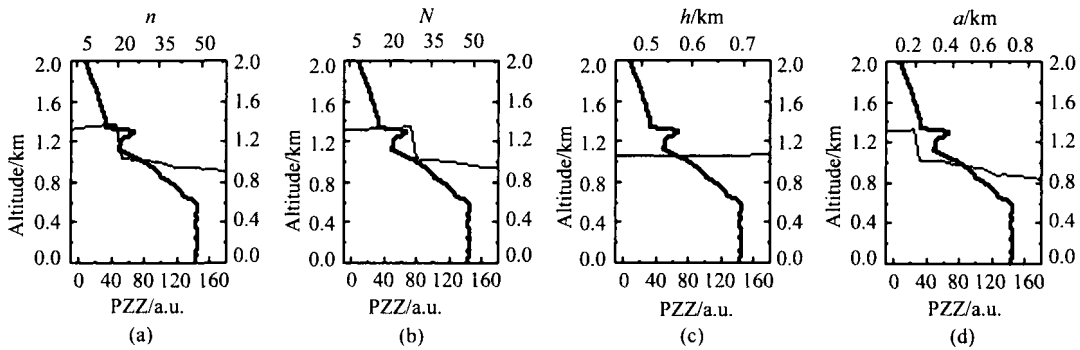


图 6 结构干扰状况下四种方法敏感度分析结果

Fig.6 Sensitive analysis of an unstable case with four methods

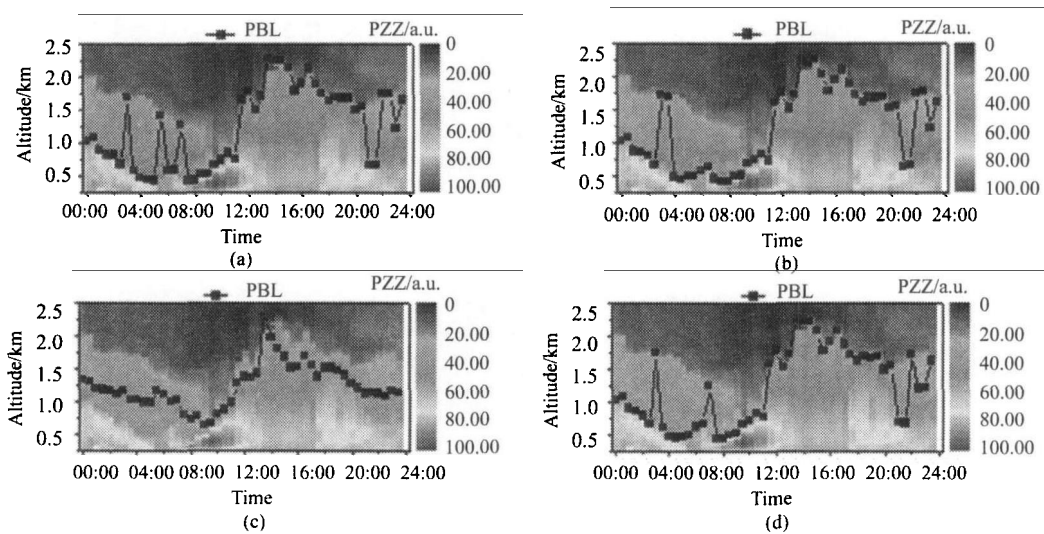


图 7 激光雷达一天连续测量回波信号时空分布及提取的大气边界层高度时间变化

Fig.7 Spatial and temporal variations of lidar signals in one day continuously and the derived height of planetary boundary layer

5 总 结

本文利用最新研制的偏振拉曼-米散射激光雷达的测量数据, 分别从仿真计算、个例分析、敏感度分析和连续测量分析入手对四种常用的激光雷达探测大气边界层高度的提取方法-梯度法、标准偏差法、曲线拟合法和小波协方差变换法进行了分析讨论。结果显示, 四种方法均可以运用于激光雷达大气边界层的高度提取, 但又各有优缺点。总体而言, 梯度法、标准偏差法和小波协方差变换法比较类似, 它们都容易受到信号局部结构的影响, 且对自身输入参数较为敏感, 但在稳定大气状况下, 提取精确度高。而曲线拟合法则受信号局部结构层影响较小, 且对自身输入参数不敏感, 提取结果比较稳定, 相对折中。故总体来看, 对于大量数据的批处理运算, 曲线拟合法最为适用。然而, 如果能够结合四种提取方法的各自优势, 进一步开发出更适用于激光雷达连续探测大气边界层高度的提取方法, 就能够更加精确地提取大气边界层高度, 这将是今后的工作内容。

参考文献:

- [1] Stull R B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology* [M]. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [2] Xie Chenbo, Mao Minjuan, Yue Guming, et al. New mobile lidar for the measurement of tropospheric aerosol [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(11): 1973-1976(in Chinese).
谢晨波, 毛敏娟, 岳古明, 等. 新型车载式激光雷达探测对流层气溶胶 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, **26**(11): 1973-1976.
- [3] Xie Chenbo, Zhou Jun, Yue Guming, et al. New mobile Raman lidar for measurement of tropospheric water vapor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1281-1286(in Chinese).
谢晨波, 周 军, 岳古明, 等. 新型车载式拉曼激光雷达测量对流层水汽 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1281-1286.
- [4] Xie C B, Zhou J, Sugimoto N, et al. Aerosol observation with Raman lidar in Beijing, China [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2010, **14**(3): 215-220.
- [5] Xie C B, Nishizawa T, Sugimoto N, et al. Characteristics of aerosol optical properties in pollution and Asian dust episodes over Beijing, China [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(27): 4945-4951.
- [6] Kunkel K E, Eloranta E W, Shipley S T. Lidar observations of the convection boundary layer [J]. *Appl. Meteorol.*, 1977, **16**: 1306-1311.
- [7] Wang Zhenzhu, Li Ju, Zhong Zhiqing, et al. Lidar exploration of atmospheric boundary layer over downtown of Beijing in summer [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, **29**(1): 96-100(in Chinese).
王珍珠, 李 炬, 钟志庆, 等. 激光雷达探测北京城区夏季大气边界层 [J]. *应用光学*, 2008, **29**(1): 96-100.
- [8] Hooper W P, Eloranta E W. Lidar measurements of wind in the planetary boundary layer: the method, accuracy and results from joint measurements with radiosonde and kytoon [J]. *J. Climate Appl. Meteorol.*, 1986, **25**(7): 990-1001.
- [9] Steyn D G, Baldi M, Hoff R M. The detection of mixed layer depth and entrainment zone thickness from lidar backscatter profiles [J]. *J. Atmos. Technol.*, 1999, **16**(7): 953-959.
- [10] Brooks I M. Finding boundary layer top: application of a wavelet covariance transform to lidar backscatter profiles [J]. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 2003, **20**(8): 1092-1105.

作者简介: 王 琳 (1986-), 女, 河北石家庄人, 研究生, 主要从事激光雷达数据反演方面的研究工作。