

文章编号: 0253-2239(2010)11-3097-06

# 基于改进微分零交叉法的米氏散射激光雷达 云检测与参数反演

毛飞跃<sup>1</sup> 龚 威<sup>1</sup> 李 俊<sup>1</sup> 张金业<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079)

<sup>2</sup> 湖北工业大学理学院, 湖北 武汉 430068

**摘要** 米氏(Mie)散射激光雷达在大气气溶胶和云层的空间分布监测中应用非常广泛,但对其回波信号进行自动准确的云检测仍存在一定的困难。微分零交叉法是目前应用最多的算法之一,但是在信噪比较低情况下会造成较多误判。根据激光雷达回波信号的特点,对微分零交叉法进行了改进。改进的算法中参考了候选点信号强度特性和前后时刻的云层信息,有效地修正了一些较为明显的误判。最后根据云检测结果对云消光系数和光学厚度进行了反演,较为客观地反映了云层内部光学参数的变化特性,初步实现了较为精确的激光雷达自动云检测和参数反演。

**关键词** 大气光学;云检测;消光系数;光学厚度;微分零交叉法;Fernald法

**中图分类号** P413

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS20103011.3097

## Cloud Detection and Parameter Retrieval Based on Improved Differential Zero-Crossing Method for Mie Lidar

Mao Feiyue<sup>1</sup> Gong Wei<sup>1</sup> Li Jun<sup>1</sup> Zhang Jinye<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China

<sup>2</sup> School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China

**Abstract** Mie lidar is widely used in the spatial distribution detection of atmospheric aerosol and cloud, but there are some difficulties in cloud detection from return signal automatically and accurately. The differential zero-crossing method is one of the dominant methods, but it has a disadvantage of big uncertainty when the signal-to-noise ratio is low. The differential zero-crossing method is improved based on the feature of the return signal of lidar. Namely the former and latter cloud information and signal intensity are referred to in the improved method, so obvious errors are efficiently avoided. Finally, the cloud extinction coefficient and optical thickness are retrieved based on the cloud detection result. The variations feature of the optical properties is represented objective. Further more, precise and automatic lidar cloud detection and coefficient retrieval are achieved preliminarily.

**Key words** atmospheric optics; cloud detection; extinction coefficient; optical thickness; differential zero-crossing method; Fernald method

**收稿日期:** 2010-01-04 **收到修改稿日期:** 2010-04-27

**基金项目:** 国家 973 计划(2009CB723905)、国家 863 计划(2009AA12Z107)、国家自然科学基金(40871171)和武汉大学博士研究生自主科研项目(904276401)资助课题。

**作者简介:** 毛飞跃(1985—),男,博士研究生,主要从事光学与激光遥感,大气气溶胶监测等方面的研究。

E-mail: mfygis@yahoo.com.cn

**导师简介:** 龚 威(1970—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光学和激光遥感,地物与大气目标探测等方面的研究。

E-mail: weigong@lmars.whu.edu.cn

# 1 引 言

云和气溶胶是全球气候变化研究中最重要也是最不确定的影响因子之一,到达地球表面的太阳辐射量直接受其分布及光学特性的影响<sup>[1]</sup>。米氏(Mie)散射激光雷达能够探测得到大气中云和气溶胶等的消光系数和后向散射系数的空间分布,在低空大气气溶胶和云层的空间分布连续监测中已经获得了广泛的应用<sup>[2~5]</sup>。从物性上分类,云也是大气气溶胶的一种,但由于云的光学特性比较特殊,在大气气溶胶的激光雷达探测中,往往将对云层的探测作为单独的一类,而把对云层以外的大气气溶胶探测归于另一类<sup>[6]</sup>。

对于密度或厚度很大的云层,激光无法将其穿透,云层之后的回波信号强度迅速衰减到噪声水平,对于这种非穿透型云层,其云顶高和云层厚度则无法精确测定,即 Mie 散射激光雷达对于探测薄的低层云和卷云比较有效,在云检测时一般仅对激光所能够探测到的范围进行处理。在激光雷达信号中,对云的准确识别是云消光系数和云光学厚度反演的基础。在对流层大气中,云层的密度要比气溶胶大得多,使云层的激光雷达回波信号特别强,人眼比较容易从回波信号中直接辨认出云层信息,但进行全自动云检测仍然存在一定的困难。

目前已经有许多学者发展了不同的云检测算法,主要有阈值法<sup>[6]</sup>、Klett 方法<sup>[7]</sup>、多传感器联合反演方法<sup>[8]</sup>和微分零交叉法<sup>[9]</sup>等。为了避免将噪声引起的微小波动误判为云,阈值法需要进行多次的细节调试,判断过程比较复杂。Klett 方法首先通过计算气溶胶的消光系数,再由消光系数的特点确定云层高度,该方法需要一些主观假设,会给计算结果带来较大的误差。多传感器联合反演方法具有令人满意的判断精度,但需要联合雷达等其它传感器的同步数据,而在大多情况下的测量并不具备其它传感器的同步观测数据,限制了此种方法的应用。微分零交叉法的结果在大多数情况下比较准确,但是在信噪比较低时,回波信号微分的过零点会很多,信号的噪声也会产生很多额外的零点,直接使用微分零交叉法会产生误判。因此,本文根据激光雷达回波信号的特点,对微分零交叉法进行了改进,改进的算法修正了可能将较厚气溶胶信号误判为云信号的缺点,并在判定是否有云时参考了前后时刻的云层信息,可以有效地避免将云误判为气溶胶。本文最后对根据云检测结果对云消光系数和光学厚度进行了反演和简单的误差分析,结果表明由于云的消光系

数和光学厚度变化较快,对云层的实时观测和自动反演非常重要。

# 2 原理与方法

## 2.1 气溶胶与云的激光雷达表征

在大气探测中,对激光雷达回波信号强度的贡献分为分子和粒子引起的瑞利(Rayleigh)散射和 Mie 散射两种,此时的激光雷达方程可以表示为<sup>[3, 5, 10]</sup>

$$P(r) = \frac{c_0}{r^2} G(r) [\beta_{\text{Ray}}(r) + \beta_{\text{Mie}}(r)] \times \exp\left\{-2 \int_0^r [\alpha_{\text{Ray}}(r') + \alpha_{\text{Mie}}(r')] dr'\right\} \quad (1)$$

式中  $r$  为激光雷达至目标的距离(m);  $P(r)$  为激光雷达接收到来自  $r$  到  $r + \Delta r$  距离段大气回波信号功率(W);  $c_0$  为激光雷达常数( $\text{sr} \cdot \text{m}^3$ );  $G(r)$  为几何重叠因子,即望远镜接收到的能量与探测目标反射回来的能量之比;  $\beta_{\text{Ray}}(r)$  与  $\beta_{\text{Mie}}(r)$  分别为分子和粒子的后向散射系数 [ $\text{m} \cdot \text{sr}^{-1}$ ];  $\alpha_{\text{Ray}}(r)$  和  $\alpha_{\text{Mie}}(r)$  分别为分子和粒子的消光系数( $\text{m}^{-1}$ )。

激光雷达的回波信号强度  $P(r)$  主要取决于气溶胶与云的后向散射系数和消光系数。由于信号强度在距离上的衰减关系,需要将不同距离上的回波信号进行  $r^2$  修正,即计算得到  $P(r)r^2$ ,以归一化到激光束发射的初始能量状态,这样不同距离上的信号强度才具有可比性。由于云的后向散射系数远大于气溶胶,所以当激光在大气中传输遇到云时,  $P(r)r^2$  将出现迅速增大的突变信号。为了更好的表征大气特征的变化,将  $r^2$  修正后的信号求对数即计算得到  $\ln[P(r)r^2]$ 。图 1 所示为武汉上空 2008 年 11 月 27 日 19:30~28 日 6:35 的激光雷达信号的  $\ln[P(r)r^2]$  形式,从图中可以看出在 2~4 km 左右

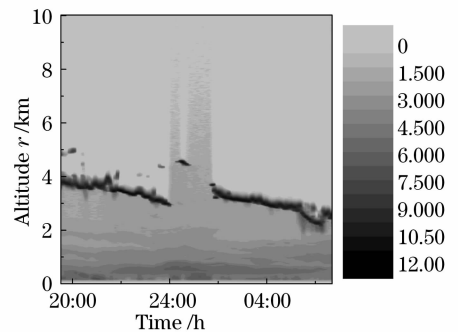


图 1 武汉 2008 年 10 月 27~28 日激光雷达观测结果

Fig. 1 Observation result of Lidar in Wuhan from Oct. 27th 2008 to Oct. 28th 2008

的范围内持续存在较强的云层信息。

### 2.2 微分零交叉法及其改进

微分零交叉法的原理如图 2 所示,其基本思想是先对回波信号进行微分得到  $dP/dr$ ,然后寻找微分信号的零点位置,其中  $r_0$  处为几何重叠因子引起的,并不判断为云,微分零点  $r_0$  处由负变正的零点附近的谷值回波信号处被判断为云底,为了排除一些明显的噪声,只有当  $dP/dr$  持续大于零的点数达到阈值  $K$  的时候,才将其判断为云底<sup>[8]</sup>;微分零点  $r_p$  处由正变负为云峰(峰值回波信号);云顶是  $P(r)r^2 < P(r)r_0^2$  的零点位置。然而微分零交叉法对激光雷达回波信号的信噪比要求较高,云和气溶胶的不均匀性和信号中的噪声会导致回波信号微分的过零点繁多复杂,特别在远场处激光雷达回波信号较弱,引起  $dP/dr$  在零左右波动,为了减少零点,对数据进行了 5 个点的拟合,Pal 等<sup>[9]</sup>建议对数据进行 5~11 个点的拟合,但是拟合数据的点数过多会使得信号失真,而且从众多的零点中提取出有效的零点仍然具有一定的困难。为此,本文对传统的微分零交叉法进行了如下的两点改进:

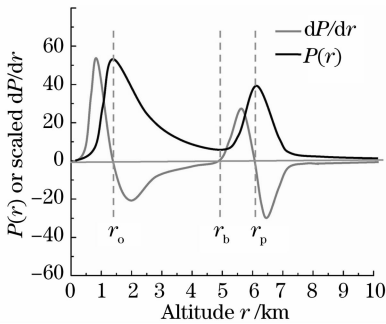


图 2 微分零交叉法示意图

Fig. 2 Illustrative diagram of differential zero-crossing method

1) 顾及邻域判据。微分零交叉法的判断中的每一步判断都只用到一根廓线数据,而考虑时间上的相关性,结合前后时间的数据进行云判断,则可以进一步增加判断的准确度。云的变化是随机的,噪声也具有随机性。当噪声的影响较大,特别是云层由厚变薄,云层信号变得不太明显时,云层信号  $dP/dr$  大于零的点数可能会小于阈值  $K$ ,或者候选云层内  $dP/dr$  最大值并达不到大于均值与若干倍的标准差之和的要求(见标准差判据说明)。例如图 3 为四根连续的激光雷达信号廓线,可以看出图 3 (a)~(c)在 3 km 左右处连续存在云层,图 3 (d)中该云层消失。对于图 3 (c)的 B 点处的云层,原始微分零交叉法会将其判断为噪声而加以

排除,该层就不会被判为有云。此时,需要对算法进行修正,即在与前一根廓线的云层信号所对应位置的一定范围内,即使后一根廓线信号的  $dP/dr$  持续大于零的点数达不到阈值  $K$  的要求,只要其值能达到弱化的阈值  $K'$  和对候选云层内  $dP/dr$  最大值的的要求,也应该将其判为云层,如图 3 (c)中的 B 点。图 3 (b)中的 A 点是个很强的峰值回波信号,该信号强度可能比有的云峰回波信号还要大,然而该信号是独立出现的,在它的前后没有类似的峰值回波信号存在,因此应该将其判断为随机的噪声。即在  $T-1$  时刻, B 处对应的高度的一定范围内存在云信号,则在  $T$  时刻,在此高度附近云层的判断阈值可弱化为  $K'$ 。反之,若在  $T+1$  时刻, B 处对应的高度的一定范围内存在云信号,则在  $T$  时刻,在此高度附近云层的判断阈值也弱化为  $K'$ 。该算法在判定是否有云时参考了前后时刻的云层情况,可以减少误判。

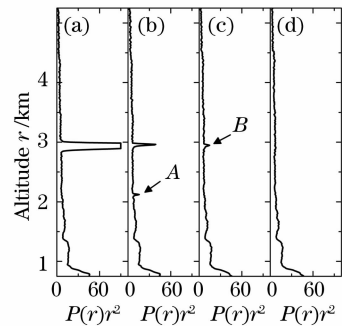


图 3 参考前后时刻云层信息的相关性分析示例  
Fig. 3 Diagram of correlation analysis referring to the former and latter cloud information

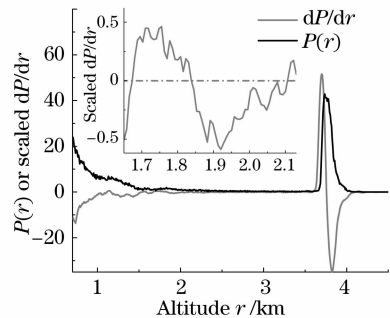


图 4 厚气溶胶信号误判为云信号示例  
Fig. 4 An example of misjudged thick aerosol as cloud

2) 标准差判据。图 4 所示为激光雷达信号  $P(r)$ 和缩放的  $dP/dr$  曲线,使用原始微分零交叉法对  $P(r)$  进行处理,在 3.5~4.0 km 范围以及 1.7~2.1 km 范围两处被判断为云层。1.7~2.1 km 范围的  $dP/dr$  如放大的子图所示,其变化过程也符合原始微分零交叉法定义云层的  $dP/dr$  变化过程,

但是从图 4 所示的激光雷达原始信号可以看出 1.7~21 km 处  $dP/dr$  变化幅度较小,可以判断该层特征是一层气溶胶。而云层的对激光的衰减作用很大,对于整个几何重叠因子影响之外区域的  $dP/dr$  来说,云层的  $dP/dr$  相对较大,因此在原来方法的基础上加入了如下规则:在初步被检测为云的信号中,如果候选云层内  $dP/dr$  的最大值小于“无云区”的  $dP/dr$  均值与若干倍标准差之和,则该处不被判断为云,该处“无云区”指的是原始微分零交叉法结合上述顾及邻域判据判断出的候选“云层”和几何重叠因子影响范围之外的区域。这样可以有效地把较

厚气溶胶信号引起的误判排除在外。

### 2.3 云的消光系数和光学厚度反演

Fernald 法是国内外使用最为广泛的激光雷达方程的求解方法<sup>[3,10~12]</sup>,它考虑了瑞利散射和 Mie 散射两者的影响,将激光雷达方程中的后向散射系数和消光系数大气分子贡献的部分和粒子贡献的部分。

如果已知标定高度  $r_c$  处粒子和空气分子的消光系数,那么令  $S_1 = \frac{\alpha_{\text{Mie}}(r)}{\beta_{\text{Mie}}(r)}$ ,  $S_2 = \frac{\alpha_{\text{Ray}}(r)}{\beta_{\text{Ray}}(r)}$ , 则可得在  $r_c$  以下高度粒子消光系数的激光雷达方程解为

$$\alpha_{\text{Mie}}(r) = -\frac{S_1}{S_2}\alpha_{\text{Ray}}(r) + \frac{P(r)r^2 \exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right)\int_r^{r_c}\alpha_{\text{Ray}}(r)dr\right]}{\frac{P(r_c)r_c^2}{\alpha_{\text{Mie}}(r_c) + \frac{S_1}{S_2}\alpha_{\text{Ray}}(r_c)} + 2\int_r^{r_c}\left\{P(r)r^2 \exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right)\int_r^{r_c}\alpha_{\text{Ray}}(r')dr'\right]dr\right\}} \quad (2)$$

从(2)式可以看出,如需要根据测量的回波信号反演出粒子的消光系数  $\alpha_{\text{Mie}}(r)$ , 必先确定  $S_1, S_2, \alpha_{\text{Ray}}(r)$  以及边界值  $\alpha_{\text{Mie}}(r_c)$ 。分子的消光系数  $\alpha_{\text{Ray}}(r)$  可以根据美国标准大气分子模式较为精确地确定;通过选取几乎不含气溶胶和云粒子的清洁大气层所在的高度位置来确定  $r_c$ , 这个高度一般选择对流层顶附近,对于 532 nm 波长激光雷达的边界值  $\alpha_{\text{Mie}}(r_c)$ , 由设定的气溶胶散射比  $R=1+\beta_{\text{Mie}}(r_c)/\beta_{\text{Ray}}(r_c)=1.01$  来确定<sup>[13,14]</sup>;大气分子的消光后向散射比  $S_2=8\pi/3$ <sup>[3]</sup>;  $S_1$  与激光雷达探测波长、云粒子的尺度谱分布、形状以及相态等紧密相关,对  $S_1$  的选择是研究难点也是热点之一,不同的学者计算或者实验得出的  $S_1$  也具有一定的差异,Ansmann 等<sup>[15]</sup>联合 Raman 散射与弹性散射激光雷达测量得出  $S_1$  多数出现在 5~15 sr 范围内;对于 532 nm 波长, O'Connor 等<sup>[16]</sup>理论计算得出水云的  $S_1=18.6\pm 1$  sr, 与王向川等<sup>[17]</sup>的计算结果  $18.92\pm 1.01$  比较吻合;Chen 等<sup>[18]</sup>根据长时间的测量实验统计得到  $S_1=29\pm 12$  sr。根据上述参考文献,本文首先选择  $S_1=20$  sr 对云光学参数进行了反演,之后分别选择  $S_1=10$  Sr 和 30 Sr 进行反演以对误差进行简要分析。

### 3 实验结果与讨论

本节主要对如图 1 所示的约 11 h 的 532 nm 波长激光雷达云探测实验结果(如图 5,图 6 所示)进行分析。实验中每分钟发射 600 个激光脉冲,每 3 min 对数

据进行一次平均并保存,数据垂直分辨率为 7.5 m。在改进的算法中,当  $dp/dr$  连续 15 个点大于零时,那么判断其起始点为云底的候选点,弱化的点阈值为 12,而原始算法的阈值恒为 15。

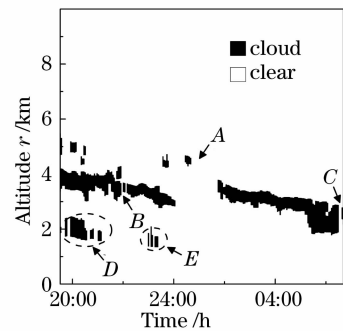


图 5 微分零交叉法的检测结果

Fig. 5 Detecting result of the differential zero-crossing method

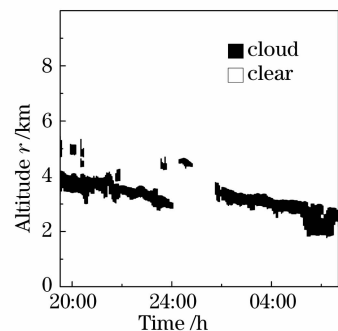


图 6 改进方法的检测结果

Fig. 6 Detecting result of the improved method

原算法和改进算法的检测结果分别如图 5 和图 6 所示。与图 5 相比,图 6 中的云层明显更加具有连贯性,与对图 1 所示原始回波信号的人眼判断较为吻合。在图 5 中的 A 处,因为云层信号  $dP/dr$  大于零的点数达不到阈值的要求,而连续的将若干廓线上的云层误判为无云,而根据弱化的阈值  $K'$  进行计算,在图 6 的相应位置正确的判断为云。此外,图 5 显示在 B 和 C 处存在一些断点,而在回波信号图中使用肉眼可以看出云层是连续的,又因为云层的变化本身就有连续性特征,所以可以说 B 和 C 处的断点是误判造成的。图 5 中的 D 和 E 处虽然云层信号  $dP/dr$  大于零的点数达到阈值的要求,但是候选云层内  $dP/dr$  的最大值没有达到“大于无云区  $dP/dr$  的均值与 3 倍的标准差之和”的要求,故在改进的算法中将其判断为无云。通过将原始算法和改进算法的实验结果结合人眼的判别可知,改进的算法能够更加可靠地反演激光雷达探测的云层信息。

此外,本文使用改进的方法对武汉上空 2008 年 10~12 月内累积 77 h 39 min 有云天气条件下的观测数据进行了处理,得到云层在 1~10 km 高度上存在时间的累积分布如图 7 所示,可以看出云层主要分布在 1~5 km 范围内,需要指出的是更高空的云层存在累积时间会受到其低空非穿透型云层影响而被低估。在处理上述数据时,对阈值和弱化阈值的取值分别主要在 13~18 和 8~12 范围内,标准差判据中的“均值与若干倍的标准差之和”中的标准差倍数主要在 2.8~3.1 之内。处理时如果将阈值和弱化阈值设的更小,那么一方面结果能够更好反应云层变化的连续性,另一方面会因为噪声的影响而增加误判,因此在选择时应该根据实际情况进行取舍,并在一定范围内对进行微调,直到得到较理想的结果。

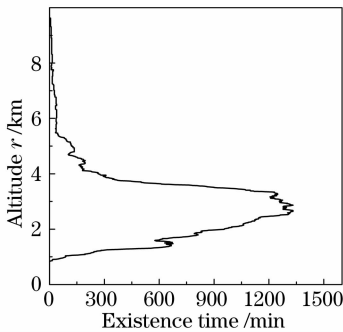


图 7 云层在 1~10 km 高度上存在时间的累积分布  
Fig. 7 Cumulative distribution of the existence time of the cloud layer at 1~10 km

基于如图 6 所示的改进算法检测结果,首先选择  $S_1=20$  sr 并使用 Fernald 方法对云消光系数和光学厚度进行了反演。云的消光系数反演结果分别如图 8 所示,统计结果显示本次观测的云消光系数范围在  $0\sim 8.75\times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$  之间,均值为  $1.01\times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ ,标准差为  $1.33\times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ ,结果表明在云层内部,消光系数非常的不均一。另外,如图 8 所示,从 2~4 km 高度范围内,存在一层厚度在 1 km 左右的云层,云层先是由厚变薄直到消失,后面又从无到有并由薄变厚,反应了厚度和范围变化的连续性,同时从图 8 可以看出云层的云底、云峰和云顶的变化比较迅速。

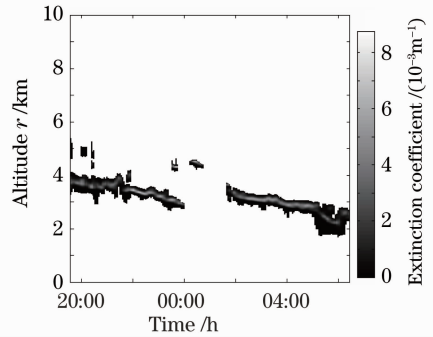


图 8 云消光系数的反演结果

Fig. 8 Retrieved results of the cloud extinction coefficient

$S_1=20$  sr 时的云光学厚度反演结果如图 9 所示,统计结果显示反演得到的云光学厚度结果变化范围分别为  $0\sim 1.13$ ,均值分别为 0.57,标准差为 0.25。同时,图 9 中还展示了  $S_1=10$  sr 和 30 sr 时的反演结果,统计结果表明, $S_1=10$  sr 和 30 sr 时的云光学厚度反演结果相对于  $S_1=20$  sr 时的结果,分别具有 0.8%~18.1% 和 0.70%~20.6% 的相对误差,因此在云消光系数和光学厚度反演时需要选择合理的  $S_1$ 。结合图 5 和图 9 可以发现,在图 5 中 B 和 C 处存在的断点,在图 9 中相应位置  $S_1=20$  sr 时的光学厚度都在 0.6 左右,如果此处不是云层而是气溶胶,那么其光学厚度会远远小于 0.6,因此可

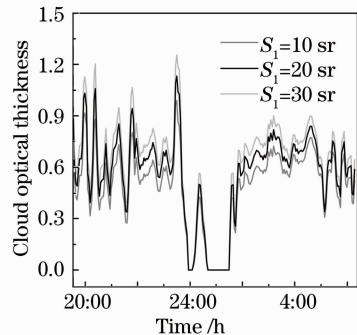


图 9 云光学厚度的反演结果

Fig. 9 Retrieved results of the cloud optical thickness

以进一步说明图 5 中 B 和 C 处的断点是误判的结果,而图 6 的结果更为合理。此外,从图 9 的云光学厚度曲线可以看出,云光学厚度变化幅度范围较广,且在较小的时间尺度上就会有明显的变化。一方面云层的光学厚度变化非常的迅速而且变化范围较广,另一方面到达地球表面的太阳辐射量直接受云层光学厚度的影响,因此对云层的实时观测和准确自动反演显得尤为重要。

## 4 结 论

针对激光雷达回波信号的特点,给出了一个基于激光雷达回波信号斜率的改进算法来检测云层信息。结果表明,该算法能够较为可靠地检测出激光雷达回波信号中的云层信息,减少了将较厚气溶胶信号误判为云层的情况;同时在判定是否有云时参考了前后时刻的云层情况,可以减少将云层误判为气溶胶的情况,该算法能够较为有效地将云层信息提取出来。但是,对于云层类型的区分,还需要对不同类型云层的回波信号特征进行进一步的研究:例如,加入偏振信息对冰云与水云加以区分等。此外,在云检测之后,使用 Fernald 方法对云的消光系数和光学厚度进行了反演,反演结果可以对云的辐射强迫作用研究,提供定量的云垂直分布信息。

## 参 考 文 献:

- 1 K. N. Liou. An Introduction to Atmospheric Radiation[M]. San Diego: Academic Press, 2002
- 2 Z. Chen, W. Liu, Y. Zhang *et al.*. Measurements of aerosol distribution by an elastic-backscatter lidar in summer 2008 in Beijing[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(9): 753~755
- 3 V. A. Kovalev, W. E. Eichinger. Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods [M]. Hoboken; Wiley-Interscience, 2004
- 4 Gao Fei, Hua Dengxin, Wu Min *et al.*. Effect of  $M^2$  factor of laser beam for a non-coaxial lidar system [J]. *Acta Optica Sinica.*, 2008, **28**(9): 1649~1654  
高飞, 华灯鑫, 吴敏等. 光束品质因子  $M^2$  对非同轴激光雷达探测性能的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1649~1654
- 5 Yan Jixiang, Gong Shunsheng, Liu Zhishen. Lidar for Monitoring Environmental [M]. Beijing: Science Press, 2001

- 阎吉祥, 龚顺生, 刘智深. 环境监测激光雷达[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- 6 D. M. Winker, M. A. Vaughan. Vertical distribution of clouds over Hampton, Virginia observed by lidar under the ECLIPS and FIRE ETO programs [J]. *Atmos. Res.*, 1994, **34** (1-4): 117~133
- 7 J. D. Klett, Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(2): 211~220
- 8 Z. Wang, K. Sassen. Cloud type and macrophysical property retrieval using multiple remote sensors [J]. *J. Appl. Meteorology and Dimatology*, 2001, **40**(10): 1665~1682
- 9 S. R. Pal, W. Steinbrecht, A. I. Carswell. Automated method for lidar determination of cloud-base height and vertical extent [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(10): 1488~1494
- 10 F. G. Fernald, Analysis of atmospheric lidar observations; some comments[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652~653
- 11 Liu Houtong, Ge Zhanqi, Wang Zhenzhu *et al.*. Extinction coefficient inversion of airborne lidar detecting in low-altitude by Fernald iterative backward integration method(FIBIM) [J]. *Acta Optica Sinica.*, 2008, **28**(10): 1837~1843  
刘厚通, 葛占旗, 王珍珠等. 利用 Fernald 迭代后向积分法反演低空探测机载激光雷达消光系数[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1837~1843
- 12 Dong Yunsheng, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Lidar study of the aerosol characteristic in Beijing during traffic controlled[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 292~296  
董云升, 刘文清, 刘建国等. 北京城区限车期间气溶胶特征激光雷达观测研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 292~296
- 13 Y. S. asano, Tropospheric aerosol extinction coefficient profiles derived from scanning lidar measurements over Tsukuba, Japan, from 1990 to 1993[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(24): 4941~4952
- 14 Yuan Song, Xin Yu, Zhou Jun. Lidar observations of the lower atmosphere in Hefei[J]. *Chinese J. of Atmospheric Sciences.*, 2005, **29**(3): 387~395  
袁松, 辛雨, 周军. 合肥市郊低层大气的激光雷达探测研究[J]. *大气科学*, 2005, **29**(3): 387~395
- 15 A. Ansmann, U. Wandinger, M. Riebesell *et al.* Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(33): 7113
- 16 E. J. O'Connor, A. J. Illingworth, R. J. Hogan. A technique for autocalibration of cloud lidar [J]. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 2004, **21**(5): 777~786
- 17 Wang Xiangchuan, Rao Ruizhong. Lidar ratios for atmospheric aerosol and cloud particles [J]. *Chinese J. Lasers.*, 2005, **32**(10): 1321~1324  
王向川, 饶瑞中. 大气气溶胶和云雾粒子的激光雷达比[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1321~1324
- 18 W. N. Chen, C. W. Chiang, J. B. Nee. Lidar ratio and depolarization ratio for cirrus clouds [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(30): 6470~6476