

机载激光雷达信号 Fernald 前向反演的 一种新定标方法

季承荔 周 军

(中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 针对机载激光雷达信号 Fernald 前向反演方法要求准确得到标定值的问题,提出了一种新的定标方法:在机载激光雷达探测得到的各条大气回波信号廓线中,使用一条已知其大气气溶胶后向散射系数垂直分布的廓线,通过机载激光雷达方程来确定出其他各条回波信号廓线上的大气气溶胶后向散射系数标定值。模拟分析和实验验证了这种定标方法的可行性,用其标定值反演出的大气气溶胶后向散射系数垂直廓线是较为合理准确的;误差分析表明由该定标方法反演的大气气溶胶后向散射系数相对误差在 20% 以内。这种定标方法是可以运用于机载激光雷达信号 Fernald 前向反演的。

关键词 大气光学; 定标方法; 米氏散射激光雷达方程; 气溶胶后向散射系数

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2051

New Calibration Method for Fernald Forward Inversion of Airborne Lidar Signals

Ji Chengli Zhou Jun

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Chinese Academy of Sciences,
Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract For Fernald forward inversion of airborne lidar signals require an accurate calibrating value, a new calibration method was put forward. Using lidar equation, atmospheric backscattering signal profiles, as well as a known aerosol backscattering coefficient profile, the calibrating values of other signal profiles are determined. Simulation and observation results indicate its feasibility. The aerosol backscattering coefficient profiles inverted by the calibrating value, which is determined by the calibration method, are relatively veracious, and the relative error of aerosol backscattering coefficient caused by the method is less than 20%. It is considered that the calibration method can be applied to Fernald forward inversion of airborne lidar signals.

Key words atmospheric optics; calibration method; Mie scattering lidar equation; aerosol backscattering coefficient

1 引 言

激光雷达以其高时空分辨率成为探测大气气溶胶的有效工具^[1]。使用激光雷达信号反演大气气溶胶后向散射系数(或消光系数)垂直分布的主要方法有 Fernald 法^[2]和 Klett 法^[3],其实这两种方法的本质是一样的,只是 Fernald 方法将大气分子和气溶胶区别开来,成为比较常用的一种反演方法^[4~6]。

运用该方法时,标定值的精确确定对反演结果的可靠性至关重要^[7]。

在对地基激光雷达的探测信号进行反演时,通常是在对流层顶附近选取一个设定的气溶胶后向散射系数作为标定值^[8],使用 Fernald 后向积分法进行反演。机载激光雷达进行的是空对地探测, Fernald 后向积分法意味着必须在飞机下方的近地

收稿日期: 2008-08-29; 收到修改稿日期: 2008-12-15

作者简介: 季承荔(1983—),女,硕士研究生,主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: jicli@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 周 军(1945—),男,研究员,主要从事激光雷达技术和激光大气遥感探测等方面的研究。

E-mail: jzhou@aiofm.ac.cn

面层设定一个标定值。由于近地面层的大气气溶胶浓度通常比较大而且不稳定,水平分布也不均匀^[9~11],因此很难对整个飞行航程中的每条大气后向散射信号廓线进行逐个标定值的设定。

为此,有人提出使用斜率法^[12]来确定标定值,但如果飞机下方的大气中不存在垂直均匀层,该方法便无法使用。还有人使用搭载辅助设备的方法^[13,14],但是提高了经费投入,增加了飞机有效载荷的负担。

本文在分析了 Fernald 前向反演法对标定值敏感性的基础上,提出了一种用于机载激光雷达信号反演的新定标方法。

2 Fernald 前向反演法对标定值的敏感性

2.1 标定值误差的敏感性分析

地基激光雷达探测信号的 Fernald 前向积分法对标定值比较敏感,反演的解不稳定^[3,15]。而机载激光雷达接收的大气后向散射信号廓线与地基有着显著的差别,印度学者研究认为:机载激光雷达探测信号的 Fernald 方法反演时,前向积分法会较地基来得稳定^[16]。为此,需就 Fernald 前向积分法对标定值的敏感性进行分析。

Fernald 前向积分为^[2]

$$\beta_1(r) = -\beta_2(r) + \frac{x(r) \exp\left[-2(S_1 - S_2) \int_{r_c}^r \beta_2(r) dr\right]}{\frac{x(r_c)}{\beta_1(r_c) + \beta_2(r_c)} - 2S_1 \int_{r_c}^r x(r) \exp\left[-2(S_1 - S_2) \int_{r_c}^r \beta_2(r') dr'\right] dr}, \quad (1)$$

式中 $x(r) = P(r)r^2$, $P(r)$ 是激光雷达接收的距离 r 处的大气后向散射回波信号; $\beta_1(r)$ 和 $\beta_2(r)$ 分别为距离 r 处的大气气溶胶和分子的后向散射系数; S_1 和 S_2 分别为大气气溶胶和分子的消光后向散射比; r_c 为标定点至激光雷达的距离。

以大气气溶胶后向散射系数标定值 $\beta_1(r_c)$ 为自变量,对(1)式进行微分

$$\partial\beta_1(r) = \frac{\beta_1(r) + \beta_2(r)}{\beta_1(r_c) + \beta_2(r_c)} \frac{x(r_c)}{x(r_c) - 2S_1 [\beta_1(r_c) + \beta_2(r_c)] \int_{r_c}^r x(r) \exp\left[-2(S_1 - S_2) \int_{r_c}^r \beta_2(r') dr'\right] dr} \partial\beta_1(r_c). \quad (2)$$

由标定值 $\beta_1(r_c)$ 的误差引起的大气气溶胶后向散射系数 $\beta_1(r)$ 的相对误差表达式为

$$\frac{\partial\beta_1(r)}{\beta_1(r)} = \frac{1 + \beta_2(r)/\beta_1(r)}{1 + \beta_2(r_c)/\beta_1(r_c)} \frac{x(r_c)}{x(r_c) - 2S_1 [\beta_1(r_c) + \beta_2(r_c)] \int_{r_c}^r x(r) \exp\left[-2(S_1 - S_2) \int_{r_c}^r \beta_2(r') dr'\right] dr} \frac{\partial\beta_1(r_c)}{\beta_1(r_c)}. \quad (3)$$

从(3)式可以看出,大气气溶胶后向散射系数的相对误差 $\partial\beta_1(r)/\beta_1(r)$ 与标定值的相对误差 $\partial\beta_1(r_c)/\beta_1(r_c)$ 成正比。即标定值 $\beta_1(r_c)$ 越准确,使用 Fernald 前向积分法反演得到的大气气溶胶后向散射系数值也越准确。

设 $\partial\beta_1(r_c)/\beta_1(r_c)$ 为某一确定值, $\partial\beta_1(r)/\beta_1(r)$ 的值由以下两项的乘积决定:

$$A = \frac{1 + \beta_2(r)/\beta_1(r)}{1 + \beta_2(r_c)/\beta_1(r_c)},$$

$$B = \frac{x(r_c)}{x(r_c) - 2S_1 [\beta_1(r_c) + \beta_2(r_c)] \int_{r_c}^r x(r) \exp\left[-2(S_1 - S_2) \int_{r_c}^r \beta_2(r') dr'\right] dr}.$$

在对流层大气中, $\beta_1(r)$ 通常随着高度的增加而逐渐减小,且减小的速率大于 $\beta_2(r)$ 。所以 A 项中的 $\beta_2(r)/\beta_1(r)$ 的值随着高度的增加总体趋势是越

来越大,分母是定值,即 A 项的值随着距离地面高度的升高在增大。

B 项中的分子以及分母的第一项均为定值 $x(r_c)$ 。分母的第二项为积分项，随着探测点与标定点距离 $(r - r_c)$ 的增加，该积分值总是不断地增大， B 项中的分母就会不断减小，因此随着探测点距离标定点越远， B 项的值就越大。当分母中两项相减差值非常小的时候， B 项就会变的无穷大；如果第一项小于第二项， B 项就会成为负值，这两种极端情况都会导致反演结果的不合理。

对于地基激光雷达大气探测而言，距离 r 即为探测高度 z ，Fernald 前向积分法是从处于近地面的标定点往对流层中上部积分，所以 A 项、 B 项的值随着与标定点距离的增加都在不断增大。在 A 、 B 两项的共同作用下，相对误差 $\partial\beta_1(r)/\beta_1(r)$ 从标定点往上急剧增大。因此，地基 Fernald 前向积分法是不稳定的，对标定值的误差比较敏感。

对于机载激光雷达大气探测而言，距离 $r = z_L - z$ (z_L 为飞机高度， z 为探测高度)，Fernald 前向

积分法是从对流层中上部的标定点往近地面积分，此时 A 项的值随着探测点与标定点距离的增加在减小，而 B 项的值随着探测点与标定点距离的增加总是不断增大的。这样，与地基反演相比，同样大小的 $\partial\beta_1(r_c)/\beta_1(r_c)$ 对机载反演所引起的 $\partial\beta_1(r)/\beta_1(r)$ 随着远离标定点的扩大趋势会有所减缓，即对标定值的误差不会像地基那样敏感。

2.2 标定值误差的敏感性计算

选取同样的一条大气气溶胶后向散射系数廓线 $\beta_1(r)$ ，分别模拟计算出地基和机载激光雷达探测到的大气回波信号，模拟方法见参考文献[17,18]。

对于地基激光雷达接收的大气回波信号，选取靠近地面的 0.03 km 高度为标定点， $\beta_1(0.03)$ 为标定值，再假定标定值分别存在 10%、20% 的相对误差，对地基激光雷达探测的大气回波信号进行 Fernald 前向反演，所得结果如图 1(a) 所示。

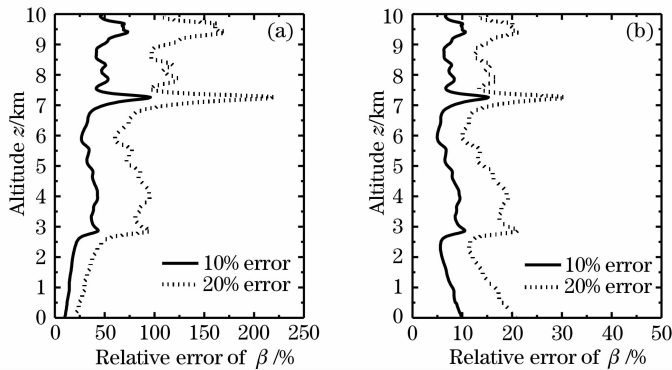


图 1 标定值误差对(a)地基激光雷达和(b)机载激光雷达探测信号 Fernald 前向反演结果的影响

Fig. 1 Effect of calibrating value error on Fernald forward inversed results of signals of ground-based lidar (a) and airborne lidar (b)

对于机载激光雷达接收的大气回波信号，选取飞机下方的 9.48 km 高度为标定点， $\beta_1(9.48)$ 为标定值，假定该标定值分别存在 10% 和 20% 的相对误差，对机载激光雷达探测的大气回波信号进行 Fernald 前向反演，所得结果如图 1 (b) 所示。

从图 1(a) 和图 1(b) 可以看出，在所有的高度上，大气气溶胶后向散射系数的误差都是随着标定值误差的增大而增大，这和(3)式中 $\partial\beta_1(r)/\beta_1(r)$ 与 $\partial\beta_1(r_c)/\beta_1(r_c)$ 成正比是一致的；由图 1(a) 可知，地基激光雷达探测信号 Fernald 前向反演时，若标定值误差为某一确定值，从标定高度 0.03 km 往上，大气气溶胶后向散射系数相对误差 $\partial\beta_1(r)/\beta_1(r)$ 呈现出不断扩大的趋势，而且扩大的速率非常快，10% 和 20% 的标定值误差所引起的 $\partial\beta_1(r)/\beta_1(r)$ 最大值分别达到了 95% 和 220%；从图 1(b) 则可以看出，

机载激光雷达探测信号 Fernald 前向反演时，标定值误差引起的大气气溶胶后向散射系数相对误差 $\partial\beta_1(r)/\beta_1(r)$ 从标定高度 9.48 km 往下没有明显的扩大趋势，10% 和 20% 的标定值误差所引起的 $\partial\beta_1(r)/\beta_1(r)$ 最大值也分别只有 15% 和 30%。因此，地基激光雷达探测信号 Fernald 前向反演方法不稳定，对标定值误差敏感，而机载激光雷达探测信号 Fernald 前向反演相对比较稳定，对标定值的敏感度比地基要小，这与 2.1 节所得结论是一致的。

需要指出的是，虽然机载激光雷达探测信号的 Fernald 前向积分法相对地基而言比较稳定，对标定值误差的敏感性有一定程度的降低，但是仍然需要准确的标定值才能保证 Fernald 前向积分法能正确反演出大气气溶胶后向散射系数垂直分布廓线 $\beta_1(r)$ 。

3 Fernald 前向反演标定值的确定方法

飞机起飞并到达飞行高度 z_L 以后, 机载激光雷达开始沿航线飞行, 并以一定的水平分辨率和垂直分辨率获得航线上 532 nm 波长大气后向散射信号垂直廓线。

$$\beta_1(z) = -\beta_2(z) + \frac{x(z) \exp\left[2(S_1 - S_2) \int_z^{z_c} \beta_2(z) dz\right]}{\frac{x(z_c)}{\beta_1(z_c) + \beta_2(z_c)} + 2S_1 \int_z^{z_c} x(r) \exp\left[2(S_1 - S_2) \int_z^{z_c} \beta_2(z') dz'\right] dz} \quad (4)$$

对机载激光雷达测量的 A' 点上空大气后向散射信号廓线 a 进行反演, 得到 532 nm 波长大气气溶胶后向散射系数垂直廓线 $\beta_{1a}(z)$ 。

在廓线 a 靠近飞机下方处, 选择一个 A 点, 该点的大气气溶胶后向散射系数 $\beta_{1a}(z_A)$ 可以从上面反演的数据 $\beta_{1a}(z)$ 中获得。对于机载激光雷达, Fernald 后向反演法是比较稳定的, 对标定值误差敏感度较低^[3]。因此, 可以认为 $\beta_{1a}(z_A)$ 值是准确的, 具有比较高的精度。

对于航线上的另一条大气后向散射信号廓线 b , 选取靠近飞机下方处一个 B 点, A 点和 B 点的机载激光雷达回波信号方程分别为^[19]

$$P_a(r_A) r_A^2 = E_a C \eta_a(r_A) [\beta_{1a}(z_A) + \beta_{2a}(z_A)] \times T_{1a}^2(r_A) T_{2a}^2(r_A), \quad (5)$$

$$P_b(r_B) r_B^2 = E_b C \eta_b(r_B) [\beta_{1b}(z_B) + \beta_{2b}(z_B)] \times T_{1b}^2(r_B) T_{2b}^2(r_B), \quad (6)$$

式中 $P(r)$ 是机载激光雷达接收的距离雷达 r 处的 532 nm 波长大气后向散射回波信号 (W); E 为机载激光雷达发射 532 nm 波长的激光能量 (J); C 为机载激光雷达系统常数 ($\text{km}^3 \text{Sr}^{-1} \text{s}^{-1}$); $\eta(r)$ 为机载激光雷达的几何重叠因子; $\beta_1(z)$ 和 $\beta_2(z)$ 分别是高度 z ($z = z_L - r$) 处 532 nm 波长大气气溶胶和空气分子的后向散射系数 ($\text{km}^{-1} \text{Sr}^{-1}$);

$$T_1(r) = \exp\left[-\int_0^r \alpha_1(r') dr'\right]$$

为机载激光雷达至机下距离 r 处 532 nm 波长的大气气溶胶透射率,

$$T_2(r) = \exp\left[-\int_0^r \alpha_2(r') dr'\right]$$

为相应的空气分子透射率; $\alpha_1(r)$ 和 $\alpha_2(r)$ 分别为距离雷达 r 处的 532 nm 波长大气气溶胶和空气分子

在飞机探测的区域内, 选择地面上一点 A' , A' 点处的 532 nm 波长大气气溶胶后向散射系数 $\beta_{1a}(z_{A'})$ 可以比较方便地使用仪器 (如浊度计等) 准确地测量。将 $\beta_{1a}(z_{A'})$ 作为标定值, 运用 Fernald 后向积分法^[2]

的消光系数 (km^{-1})。

将 (6) 式除以 (5) 式, 整理, 可得 B 点的 532 nm 波长大气气溶胶后向散射系数

$$\beta_{1b}(z_B) = \frac{P_b(r_B) r_B^2 E_a \eta_a(r_A) T_{1a}^2(r_A) T_{2a}^2(r_A)}{P_a(r_A) r_A^2 E_b \eta_b(r_B) T_{1b}^2(r_B) T_{2b}^2(r_B)} \times [\beta_{1a}(z_A) + \beta_{2a}(z_A)] - \beta_{2b}(z_B), \quad (7)$$

式中 A 点的大气气溶胶后向散射系数 $\beta_{1a}(z_A)$ 已知; $P_a(r_A)$, $P_b(r_B)$, r_A^2 , r_B^2 由机载激光雷达接收的大气后向散射信号廓线数据得到; E_a , E_b 由机载激光雷达能量计实时检测得到; 几何重叠因子 $\eta_a(r_A)$, $\eta_b(r_B)$ 在激光雷达进行探测之前已经测得; $\beta_{2a}(z_A)$, $\beta_{2b}(z_B)$, $T_{2a}^2(r_A)$, $T_{2b}^2(r_B)$ 可由大气分子消光模式计算得到^[18]。

至此, (7) 式中等号右边只有 $T_{1a}^2(r_A)/[T_{1b}^2(r_B)]$ 为未知量, 其他所有量均已知。由大气气溶胶双程透射率的表达式

$$T_1^2(r) = \exp\left[-2 \int_0^r \alpha_1(r') dr'\right]$$

可知, 飞机至 A 点、 B 点的距离 r 越短, 该距离范围内的气溶胶消光系数 $\alpha_1(r)$ 越小, 则 $T_1^2(r)$ 就越接近 1。由于 A 点、 B 点均取在距离飞机下方不远处, 即 r_A , r_B 都很小, 且根据多年的地基激光雷达大气气溶胶的探测研究可知: 飞机下方的高层大气通常均较为洁净, 边界层以上的大气气溶胶的消光系数一般都比空气分子小且水平分布较为均匀^[9~11], 因此可以近似认为 $T_{1a}^2(r_A)/T_{1b}^2(r_B) \approx 1$ 。这样, 将所有已知参数代入到 (7) 式, 即可计算得到 B 点处的 532 nm 波长大气气溶胶后向散射系数 $\beta_{1b}(z_B)$ 。

以 $\beta_{1b}(z_B)$ 作为标定值, 使用 Fernald 前向反演法 (1) 式, 可得到 b 的 532 nm 波长大气气溶胶后向散射系数垂直廓线 $\beta_{1b}(z)$ 。同理可得飞机航程中其他大气气溶胶后向散射系数垂直廓线。

4 定标方法的应用

4.1 模拟应用

根据地基激光雷达于 2008 年 4 月 24 日北京时间 09:14 和 10:26 在合肥地区测得的 532 nm 波长大气气溶胶后向散射系数垂直廓线 $\beta_{09:14}(z)$ 和 $\beta_{10:26}(z)$, 分别模拟计算出机载激光雷达在 10 km 飞行高度上接收到的两条 532 nm 波长大气后向散射回波信号廓线 $P_{09:14}(z)$ 和 $P_{10:26}(z)$, 模拟方法见参考文献[18]。

选取 0.03 km 高度处的 $\beta_{09:14}(0.03)$ 作为标定值, 使用 Fernald 后向积分 (4) 式对信号廓线 $P_{09:14}(z)$ 进行反演, 得到大气气溶胶后向散射系数垂直廓线 $\beta'_{09:14}(z)$, 与地基激光雷达探测的 $\beta_{09:14}(z)$ 作比较, 结果如图 2(a) 所示。可以看出, 两条廓线

吻合。说明在机载激光雷达大气探测中, 如果在近地面的 A' 点可以准确地获得标定值, 运用 Fernald 后向积分反演出的大气气溶胶后向散射系数垂直廓线是正确的。

选取距离飞机下方 500 m 远的 9.48 km 高度处为 A 点, 使用 $\beta'_{09:14}(9.48)$ 作为 A 点的值; 同样, 选取 $P_{10:26}(z)$ 上 9.48 km 高度处为 B 点, B 点的大气气溶胶后向散射系数 $\beta'_{10:26}(9.48)$ 由 (7) 式计算得到。以 $\beta'_{10:26}(9.48)$ 为标定值, 对 $P_{10:26}(z)$ 进行 Fernald 前向反演, 得到 $\beta'_{10:26}(z)$, 并与地基激光雷达测量的结果 $\beta_{10:26}(z)$ 进行比较, 结果如图 2(b) 所示。可以看到, 两条廓线除了有细微的数值差别外, 还是非常吻合的。说明这种定标方法反演所得的结果比较准确。

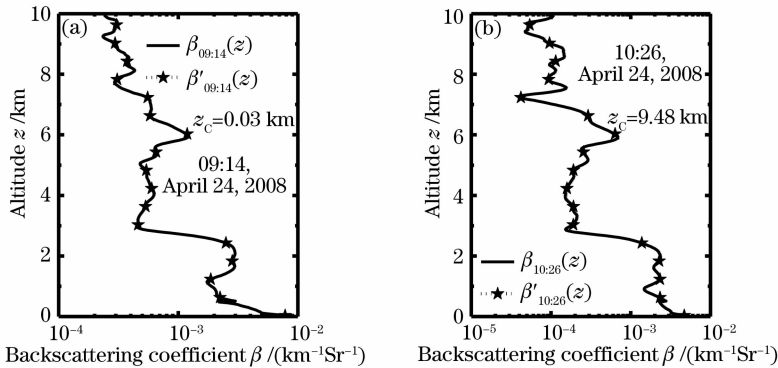


图 2 (a) 机载 Fernald 后向反演和 (b) 机载 Fernald 前向反演与地基激光雷达实际测量大气气溶胶后向散射系数垂直廓线的比较
Fig. 2 Comparison of aerosol backscattering coefficient profiles inverted by airborne Fernald backward integral (a) and forward integral (b) with the one measured by ground-based lidar

4.2 实际探测应用

选取机载米氏 (Mie) 散射激光雷达于 2005 年 11 月 11 日 14:38, 14:58 以及 15:18 在青岛地区测量的 532 nm 波长大气后向散射回波信号廓线, 应用于机载激光雷达信号 Fernald 前向反演的定标方法。

由于在青岛地区实验时, 没有测量探测区域地面的 532 nm 波长大气后向散射系数, 因此使用斜率法对 14:38 的信号廓线进行定标, 反演得到 14:38 的 532 nm 波长大气气溶胶后向散射系数廓线。由此得知位于飞机下方的 3.0 km 高度处的 $\beta_{14:38}(3.0)$ 。使用第 2 节叙述的方法, 由 (7) 式分别计算得到 $\beta_{14:58}(3.0)$ 和 $\beta_{15:18}(3.0)$ 。利用这两个标定值, 使用 Fernald 前向积分反演得到相应时刻的 532 nm 波长大气气溶胶后向散射系数垂直廓线, 结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出, 14:58 和 15:18 两个时刻的 532 nm 波长大气气溶胶后向散射系数廓线与 14:38

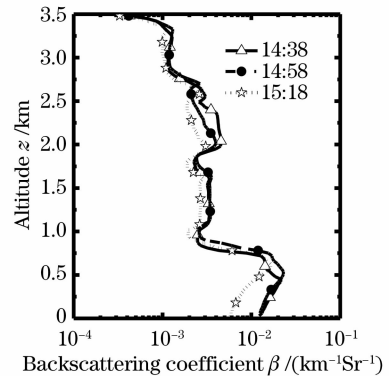


图 3 3 条 532 nm 波长大气气溶胶后向散射系数垂直廓线
Fig. 3 Three aerosol backscattering coefficient profiles at 532 nm wavelength

时的结果基本上是类似的, 仅在局部有一些细微差别。大气气溶胶层的高度和厚度随航程的变化也不大, 这正是海洋大气水平分布的典型特点, 与当时飞行路径下垫面为近陆地的黄海海面是符合的^[20]。

此外,对机载激光雷达在 14:58 和 15:18 时接收的 532 nm 波长大气后向散射信号廓线分别使用本文提出的方法和斜率法进行定标,并将得到的反演结果进行比较,结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看到,在 14:58 时,两种定标方法

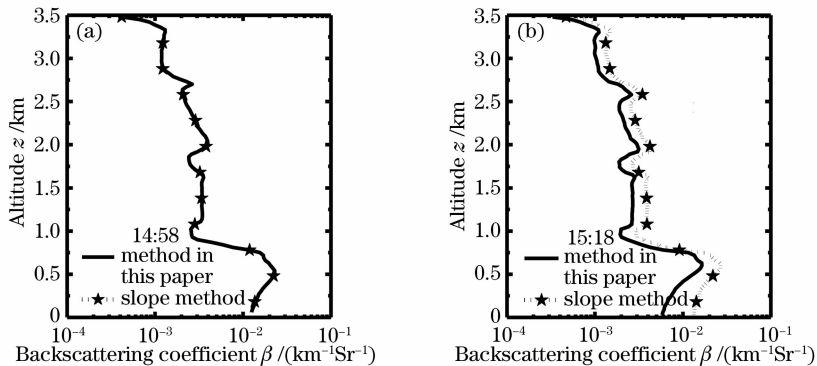


图 4 两种定标方法得到的反演结果比较。(a) 14:58 时; (b) 15:18 时

Fig. 4 Comparison between the inversion results by two different calibration methods. (a) at 14:58; (b) at 15:18

初步分析造成这种差异的原因有两个:1) 运用本文所述定标方法时,由于青岛实验的飞行高度比较低,只有 3.5 km,这个高度不一定是理想的大气洁净层,且水平分布也很难保证是均匀的,当时飞机的航速为 220 km/h^[20],15:18 和 14:38 时所测的地点水平距离已有近 150 km。所以假定大气透射率比值为 1 导致了一定的误差;2) 15:18 时的大气回波信号数据在斜率法选取的 1.17~1.56 km 高度范围内大气层的垂直均匀程度没有 14:58 时的好,用斜率法定标也会有一定的误差。

总体来说两种方法得到的结果差别不是很大,对于本文所述的定标方法,飞机飞行的高度越高,飞机下方晴空大气气溶胶的浓度通常会越低,水平分布的均匀性也越好,这样,假定透射率比值为 1 引起的误差也会越小。

以上分析表明,对于机载激光雷达大气探测,使用本文方法和 Fernald 前向积分可以反演出大气气溶胶后向散射系数垂直廓线,反演的结果是合理的。

5 误差分析

5.1 标定值的误差

由(7)式可知,标定值的误差来源主要为以下几项:回波信号比值 $P_b(r_B)/P_a(r_A)$; 能量比值 E_a/E_b ; 几何重叠因子比值 $\eta_a(r_A)/\eta_b(r_B)$; A 点的气溶胶后向散射系数值 $\beta_{1a}(z_A)$; 大气分子模式误差; 以及大气气溶胶透射率比值 $\delta_T = T_{1a}^2(r_A)/T_{1b}^2(r_B)$ 。

其中,累积的回波信号误差在 5% 以内,能量计

得到的 532 nm 波长大气气溶胶后向散射系数廓线的反演结果吻合得比较好,几乎完全重合。但在 15:18 时,两种定标方法得到的反演结果有一定的差别,垂直结构的分布较为一致,但数值上两者有差异。

的测量误差在 3% 以内; 由于所使用的几何重叠因子都是相同的,当 $r_A = r_B$ 时, $\eta_a(r_A)/\eta_b(r_B)$ 的误差可以消除; 大气分子消光模式的误差为 3%^[21]; $\beta_{1a}(z_A)$ 由 Fernald 后向积分所得,比较准确,误差可忽略不计; 本文中假定大气气溶胶透射率比值 δ_T 为 1,产生的误差大小需要进行详细分析。

图 5 给出了地基激光雷达观测的合肥地区 2001 年、2002 年、2003 年 10 km 以下大气气溶胶后向散射系数垂直分布统计特征,表 1 给出了 9.99~9.48 km 的双程大气透射率 T^2 , δ_T 及由此产生的误差 $\Delta\delta_T$ 。

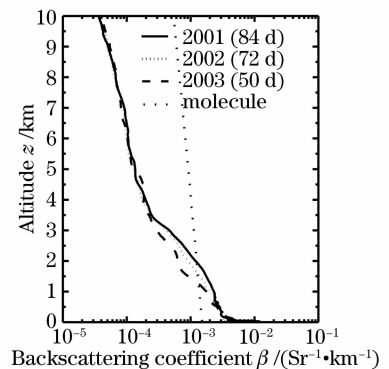


图 5 大气气溶胶后向散射系数垂直分布统计特征
Fig. 5 Statistic characteristic of vertical distribution of aerosol backscattering coefficient

由图 5 可以看出,一般在 3.5 km 以上高度区域,大气气溶胶后向散射系数都比较小,变化也不大,水平分布也相对均匀。所以当飞机飞行高度较高时,即使两条信号廓线水平距离相差较远,假定

$\delta_T \approx 1$ 的误差也很小。由表 1 也可以看到,从 9.99~9.48 km 高度假定透射率比值为 1 产生的误差非常微小。

表 1 9.99~9.48 km 大气透射率产生的误差

Table 1 Error caused by atmospheric transmittance during 9.99~9.48 km

	2001	2002	2003
T^2	0.9979	0.9979	0.9976
$\delta_T = \frac{T_{1a}^2(r_A)}{T_{1b}^2(r_B)}$	—	1.0000	1.0003
$\Delta \left[\frac{T_{1a}^2(r_A)}{T_{1b}^2(r_B)} \right] = \frac{ 1 - \delta_T }{1} \times 100\%$	—	0.00%	0.03%

综合上述分析,由(7)式计算得到的标定值误差不会超过 20%。

5.2 标定值误差对反演结果的影响

当飞行高度为 10 km,标定值误差为 20%时对反演结果的影响见图 1(b)。当标定值误差为 20%时,整条大气气溶胶后向散射系数廓线的相对误差都不是很大,基本维持在 20%左右,误差最大值出现在气溶胶浓度较低的 7.26 km 高度处,也只有 30%(且由于该处的气溶胶浓度低,虽然相对误差较大,但绝对误差值很小)。

因此,可以认为本文方法引起的反演结果误差不会很大,可以满足机载激光雷达信号数据反演的需求。

6 结 论

灵敏度分析表明,使用 Fernald 前向积分法对机载激光雷达信号进行反演时,虽然较地基反演要稳定一些,但仍然要求准确地确定标定值。由此提出了一种定标方法:对于一条机载激光雷达探测的回波信号廓线,如果其大气气溶胶后向散射系数的垂直分布已知,则可以通过机载激光雷达方程来确定出另一条回波信号廓线上的大气气溶胶后向散射系数标定值。

将这种定标方法应用于机载激光雷达在 10 km 高空接收的模拟信号 Fernald 前向反演中,得到的大气气溶胶后向散射系数廓线与实际值吻合的较好,仅有微小的数值差异;将定标方法应用于机载激光雷达在 3.5 km 高度接收的实测信号 Fernald 前向反演时,得到结果也比较合理,与斜率法定标所得结果相比,两者较为一致。误差分析表明:由这种定标方法反演的大气气溶胶后向散射系数相对误差在 20%以内。因此,这种定标方法得到的标定值是比

较准确的,能够运用于机载激光雷达信号的 Fernald 前向反演。

在实际运用这种定标方法时,还需要注意一些问题,如选取 A, B 点时尽量使得 $r_A = r_B$,这样既可以减小透射率产生的误差,也可以防止几何因子不准确造成的差别;当飞机在高空飞行时,由于廓线 a 是用仪器定标反演得到,相对比较准确,所以在对每一条廓线定标时,都尽可能选择廓线 a 的数据作为已知的后向散射系数值,以免误差在计算过程中进行传递和累积,但在 3.5 km 以下的低空飞行时,若水平距离相隔较远,则可考虑选择邻近的廓线进行定标。此定标方法需要在以后的机载激光雷达探测实验中得到进一步的检验和完善。

参 考 文 献

- Cao Kaifa, Du Xiaoyong, Wang Shaolin *et al.*. Determination of lidar geometric form factor with pure rotational Raman scattering signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1349~1354
- 曹开法, 杜小勇, 汪少林 等. 纯转动拉曼法确定激光雷达几何因子[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1349~1354
- Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: Some comment[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652~653
- Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(2): 212~220
- Yuan Song, Xin Yu, Zhou Jun. Lidar observations of the lower atmosphere in Hefei[J]. *Chinese J. 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
- Young S A. Analysis of lidar backscatter profiles in optically thin clouds[J]. *Opt. Soc. Am.*, 1995, **34**(30): 7019~7031
- 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
- 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
- Qiu J H. Sensitivity of lidar equation solution to boundary values and determination of the values[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 1988, **5**(2): 229~241
- Sasano Y. Tropospheric aerosol extinction coefficient profiles derived from scanning lidar measurement over Tsukuba, Japan, from 1990 to 1993[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**: 4941~4952
- Xie Chenbo, Zhou Jun, Yue Guming *et al.*. Mobile lidar system for measuring tropospheric aerosol and water vapor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(3): 365~368
- 谢晨波, 周军, 岳古明 等. 测量大气气溶胶和水汽的车载式激光雷达系统[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(3): 365~368
- Karasinski G, Kardas A E, Markowicz K *et al.*. Lidar investigation of properties of atmospheric aerosol[J]. *Eur. Phys. J. Special Topics*, 2007, **144**: 129~138
- Zhong Zhiqing, Zhou Jun, Qi Fudi *et al.*. Portable Mie lidar for monitoring atmospheric aerosol extinction[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(12): 1145~1147
- 钟志庆, 周军, 戚福弟 等. 探测大气气溶胶消光系数的便携式米散射激光雷达[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(12): 1145~1147
- Kunz G J, Leeuw G D. Inversion of signals with the slope method[J]. *Opt. Soc. Am.*, 1993, **32**(18): 3249~3256

- 13 Winker D M, Couch R H, McCormick M P. An overview of LITE: NASA's lidar in-space technology experiment[J]. *Proc. IEEE*, 1996, **84**(2): 164~180
- 14 Kuzmanoski M, Box M A, Schmid B *et al.*. Case study of modeled aerosol optical properties during the SAFARI 2000 campaign[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 5263~5275
- 15 Bissonnette L R. Sensitivity analysis of lidar inversion algorithms [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(13): 2122~2125
- 16 Gadhavi H, Jayaraman A. Airborne lidar study of the vertical distribution of aerosols over hyderabad, an urban site in central india, and Its implication for radiative forcing calculations[J]. *Ann. Geophys*, 2006, **24**: 2461~2470
- 17 Zhong Zhiqing, Zhou Jun. Simulated signal calculation for micro pulse lidar[J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2003, **20**(5): 618~622
钟志庆,周 军. 微脉冲激光雷达探测信号的数值模拟计算[J]. *量子电子学报*, 2003, **20**(5): 618~622
- 18 Ji Chengli, Zhou Jun. Simulation of signal and signal-to-noise ratio received by an airborne dual-wavelength Mie lidar[J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, **3**(4): 250~261
季承荔,周 军. 机载双波长米散射激光雷达大气回波信号与信噪比的模拟计算[J]. *大气与环境光学学报*, 2008, **3**(4): 250~261
- 19 Sun Jingqun. Atmospheric Sounding and Observing by Laser [M]. Beijing: Science Press, 1986. 69~71
孙景群. 激光大气探测[M]. 北京: 科学出版社, 1986. 69~71
- 20 Mao Minjuan, Zhang Yinchao, Fang Haitao *et al.*. Detection of aerosol distribution by atmospheric environment airborne lidar over Qingdao and adjacent sea area [J]. *Chinese J. Geophys*, 2007, **50**(2): 370~376
毛敏娟,张寅超,方海涛 等. 机载激光雷达对青岛及周边海域的气溶胶探测[J]. *地球物理学报*, 2007, **50**(2): 370~376
- 21 Russell P B, Swissler T J, Patrick M. Methodology for error analysis and simulation of lidar aerosol measurements[J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(22): 3783~3797