

基于激光雷达探测的气溶胶分类方法研究

曹念文¹ 颜 鹏²

(¹ 南京信息工程大学中国气象局气溶胶云降水重点实验室, 江苏 南京 210044)
² 中国气象科学院大气成分分析中心, 北京 100081)

摘要 提出了利用激光雷达区分不同类型气溶胶的新方法。建立了包含背景气溶胶和云两种不同类型气溶胶光学参数(后向散射系数、消光系数)的两个激光雷达方程,并推导计算其解的表达式。反演出两种不同类别气溶胶的光学参数,以此区分背景气溶胶和云。根据两种不同气溶胶的光学参数与两种不同消光后向散射比($S_{\text{aer}1}$, $S_{\text{aer}2}$)模拟激光雷达回波信号,并用该新方法反演得到两不同类别气溶胶的光学参数。反演结果与不同类型气溶胶的模拟参数一致。用该方法区分激光雷达同时探测到的大气背景气溶胶和云。模拟和测量结果都证实了该方法对不同类型气溶胶进行分类的可行性。

关键词 遥感;气溶胶分类;背景气溶胶;云

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.1101003

Aerosol Classifications Method by Lidar Measurements

Cao Nianwen¹ Yan Peng²

¹ Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

² Center for Atmosphere Watch and Services, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

Abstract A new method about how to classify different aerosols by lidar measurements is proposed. Two lidar equations including the optical parameters about background aerosol and cloud are built. The inversions about the two lidar equations are given to classify the background aerosol and cloud. The lidar signals related to two different aerosols, with two different extinctions to backscatter coefficient ratios ($S_{\text{aer}1}$, $S_{\text{aer}2}$), are simulated. The inversions about the two simulated lidar signals are obtained. The background aerosol and cloud are measured by lidar, and the two different aerosols are obviously classified according to the analyzed measuremental results by using this method. The simulation and measuremental results verify the effectiveness of the method for aerosol classification.

Key words remote sensing; aerosol classifications; background aerosols; cloud

OCIS codes 010.3640; 010.1350; 010.1110; 010.0280; 010.1615

1 引 言

气溶胶光学参数廓线(如后向散射系数廓线)和消光系数廓线能够使用 Klett 和 Fernald 等传统方法从激光雷达回波信号反演得到^[1-3]。在 Klett 方法中气溶胶消光系数反演要利用假定的边界值 σ_m 和气溶胶波长依赖参数 k (后向散射系数 β 和消光系数 α 关系, $\beta = c \times \alpha^k$, c 为常数), k 值依赖于激光雷达波长和气溶胶特征,取值 $0.67 < k < 1$ 。当 k 值选定

后, k 值在激光雷达测量的整个高度范围内保持不变。 k 值的选定,意味着在光学参数反演的整个过程中,只有一种类型的气溶胶存在。在 Fernald 方法中,大气分子光学参数,后向散射系数 $\beta_{\text{mol}}(r)$ 和消光系数 $\alpha_{\text{mol}}(r)$,能够从可信的气象数据得到或者由适当的标准大气估算得到。只有气溶胶光学参数,即后向散射系数 $\beta_{\text{aer}}(r)$ 和消光系数 $\alpha_{\text{aer}}(r)$,需要计算才能得到^[4-7]。在整个反演过程中,假设气溶胶消

收稿日期: 2014-05-20; 收到修改稿日期: 2014-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(41175033, 41375044)、公益性行业专项(GYHY201006047-5)

作者简介: 曹念文(1967—),男,博士,教授,主要从事激光大气探测方面的研究。E-mail: nwcao@nuist.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

光后向散射比 $S(r) = \sigma_{\text{aer}}(r) / \beta_{\text{aer}}(r)$ 为一常数, 且不随高度发生变化。这表明了气溶胶的粒径大小分布和成分在激光雷达探测中不随高度变化。意味着如果 S 假定后, 气溶胶的物理 / 光学特征(气溶胶类型)在整个反演过程中就确定了。 $S(r)$ 为一常数, 表明在反演过程中只存在一种类型的气溶胶。在 Klett 和 Fernald 方法中只能假设一种类型的气溶胶 [$k, S(r)$ 不随高度变化, 为一确定常数] 存在, 其局限性是不能把不同类型的气溶胶从混合存在的状态中一一反演和区分开来。实际上, 不同类型的气溶胶常常混合在大气中。比如, 非均匀动态的对流层大气气溶胶实际上是由不同类型气溶胶混合在一起组成的。然而, 如何利用激光雷达区分不同气溶胶报道较少。本文提出了一种新方法, 能够利用激光雷达探测和区分不同类型的气溶胶, 建立了包含不同气溶胶特征 [不同的 $S_i(r)$, 同一个位置, 存在

不同的气溶胶消光后向散射比] 的激光雷达方程, 推导并计算出其解。

利用该方法, 对于多种气溶胶混合并存的情况, 其光学参数能被反演, 不同类型的气溶胶能够被区分。模拟由不同类型气溶胶散射得到的激光雷达信号。从激光雷达模拟信号中反演计算得到不同类型气溶胶消光系数, 与激光雷达信号模拟中假定的气溶胶特征参数很好地吻合。在实际激光雷达探测中用该方法区分不同类型气溶胶, 通过联合求解两个激光雷达方程, 将云从背景气溶胶中区分出来。这证实了不同气溶胶分类新方法的可行性。

2 理论模型

由类型 1 气溶胶和大气分子组成的混合体相对应的激光雷达方程可表示为

$$P_1(z)z^2 = K_{01}[\beta_{\text{mol}}(z) + \beta_{\text{aer1}}(z)] \exp\left\{-\int_0^z [S_{\text{mol}}\beta_{\text{mol}}(z) + S_{\text{aer1}}\beta_{\text{aer1}}(z)] dz\right\}, \quad (1)$$

式中 $\beta_{\text{mol}}(z)$ 是分子后向散射系数, $\beta_{\text{aer1}}(z)$ 为类型 1 气溶胶的后向散射系数, S_{mol} 为 $8\pi/3$, S_{aer1} 是类型 1 气溶胶消光后向散射比, K_{01} 是与激光能量有关的激光雷达系统常数, $P_1(z)$ 是激光雷达回波信号。相应地, 由类型 1 气溶胶、类型 2 气溶胶和大气分子组成的混合体相对应的激光雷达方程为

$$P_2(z)z^2 = K_{02}[\beta_{\text{mol}}(z) + \beta_{\text{aer1}}(z) + \beta_{\text{aer2}}(z)] \exp\left\{-\int_0^z [S_{\text{mol}}\beta_{\text{mol}}(z) + S_{\text{aer1}}\beta_{\text{aer1}}(z) + S_{\text{aer2}}\beta_{\text{aer2}}(z)] dz\right\}, \quad (2)$$

式中 $\beta_{\text{aer2}}(z)$ 是类型 2 气溶胶后向散射系数, S_{aer2} 为类型 2 气溶胶的消光后向散射比, K_{02} 是激光雷达系统常数, $P_2(z)$ 是激光雷达回波信号。通过推导计算得到方程(1)和(2)式的解, 即两种不同类型气溶胶光学参数。类型 1 气溶胶后向散射系数廓线可表示为

$$\beta_{\text{aer1}}(z) = \frac{1}{\exp\left\{\int_0^z \left[\frac{P_1'(z)}{P_1(z)} + \frac{2}{z} + (S_{\text{mol}} - S_{\text{aer1}})\beta_{\text{mol}}(z)\right] dz\right\} \left\{-\int_0^z S_{\text{aer1}} \exp\left\{\int_0^z \left[\frac{P_1'(z)}{P_1(z)} + \frac{2}{z} + (S_{\text{mol}} - S_{\text{aer1}})\beta_{\text{mol}}(z)\right] dz\right\} dz + C_1\right\}} - \beta_{\text{mol}}(z), \quad (3)$$

类型 2 气溶胶的后向散射系数廓线为

$$\beta_{\text{aer2}}(z) = \frac{P_2(z)z^2}{\exp\left\{-\int_0^z [(S_{\text{mol}} - K_{\text{aer2}})\beta_{\text{mol}}(z) + (S_{\text{aer1}} - S_{\text{aer2}})\beta_{\text{aer1}}(z)] dz\right\}} \times \frac{1}{\left\{-\int_0^z \frac{P_2(z)z^2}{\exp\left\{-\int_0^z [(S_{\text{mol}} - S_{\text{aer2}})\beta_{\text{mol}}(z) + (S_{\text{aer1}} - S_{\text{aer2}})\beta_{\text{aer1}}(z)] dz\right\}} dz + C_2\right\}} - \beta_{\text{mol}}(z) - \beta_{\text{aer1}}(z), \quad (4)$$

因此, 利用方程(1)式和(2)式的解(3)式和(4)式可以区分两种不同气溶胶类型: (3)式表示的一般是分布均匀的背景气溶胶, 其后向散射系数廓线一般比较光滑, 且随高度的增加逐渐减小; 而(4)式表示

的一般为分布非均匀的云、沙尘或突发性的污染气溶胶。从(3)、(4)式可知根据廓线结构很容易区分两种不同类型气溶胶。通过人眼睛观测再结合激光雷达回波信号(或者距离矫正信号)与反演所得的后

向散射系数廓线(消光系数廓线)波形,即可把不同类型气溶胶区分开来。

3 数值模拟

假定由两种类型气溶胶(均匀的背景气溶胶和层状气溶胶)同时存在,依此用 Matlab 软件来模拟激光雷达信号。两种不同类型气溶胶和大气分子光学参数假设如图 1 所示。图 1 中 1)是假定的层状气溶胶的消光系数,2)是假定的均匀背景气溶胶消光系数,3)是由标准大气得到的分子消光系数。

根据图 1 中的参数,可以模拟激光雷达距离平方校正信号 $P(r)r^2$,如图 2 所示。图 2 中,1)是通过图 1 中 2)的背景气溶胶参数和图 1 中 3)的分子参数模拟得到的激光雷达距离平方校正信号。图 2 中 2)是由图 1 中 1)的层状气溶胶、2)的背景气溶胶、3)分子的参数模拟得到的距离校正激光雷达信号。

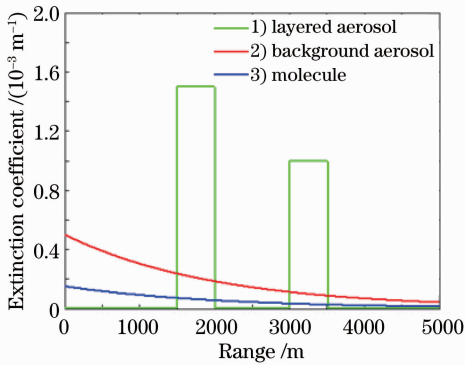


图 1 雷达信号模拟使用的消光系数

Fig. 1 Extinction coefficients in lidar signal simulations

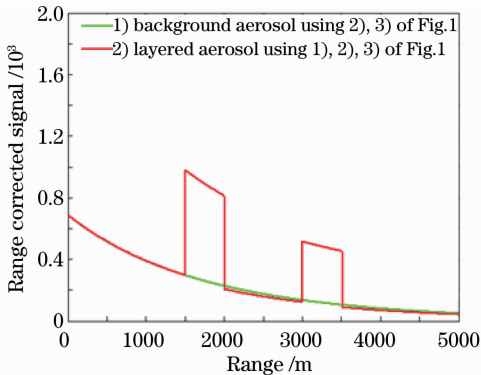


图 2 模拟信号

Fig. 2 Simulated signals

根据方程(3)式,类型 1 气溶胶(背景气溶胶)的后向散射系数廓线由图 2 中 1)的激光雷达距离校正信号 $P(r)r^2$ 反演得到,其结果如图 3 所示。在反演过程中, S_{mol} 取 $8\pi/3$, S_{aer1} 取 10, β_{mol} 由标准大气得到。反演得到类型 1 气溶胶的后向散射系数由

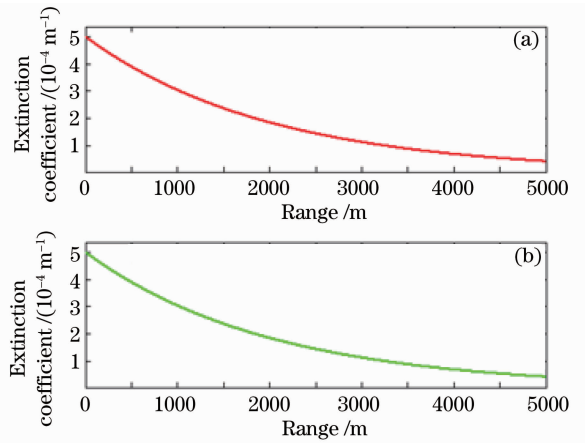


图 3 (a)背景气溶胶消光系数;(b)从图 2 中 1)信号用方程(3)式反演出的消光系数

Fig. 3 (a) Background aerosol extinction coefficient used in simulation; (b) inversed extinction coefficient from 1) of Fig. 2 by equation (3)

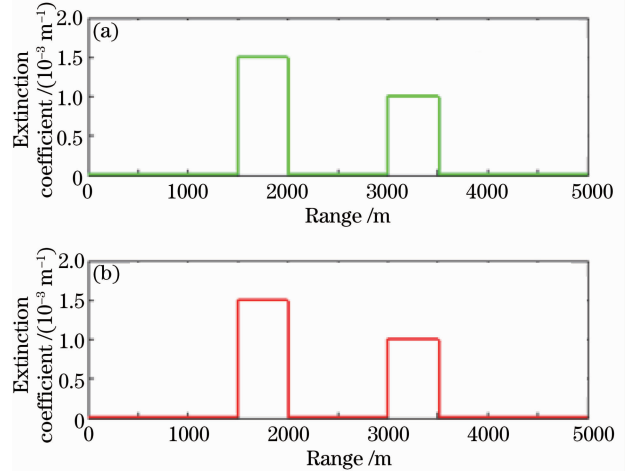


图 4 (a)层状气溶胶消光系数;(b)从图 2 中 2)信号用方程(4)式反演出的消光系数

Fig. 4 (a) Layered aerosol extinction coefficient used in simulation; (b) inversed extinction coefficient from 2) of Fig. 2 by equation (4)

$\alpha_{aer1}(z) = S_{aer1} \times \beta_{aer1}(z)$ 转化为消光系数,如图 3(b)所示,与用于模拟激光雷达距离校正信号所用的背景气溶胶消光系数廓线[见图 3(a)]很好地吻合。这一结果验证了方程(1)式及其解(3)式的正确性。同样,根据图 2 中 2)的模拟激光雷达信号,利用方程(2)式及其解(4)式反演得到类型 2 气溶胶(层状气溶胶)的消光系数廓线,其结果如图 4 所示。反演计算中, S_{aer2} 取 20,其他参数 S_{mol} , S_{aer1} , β_{mol} 均与方程(1)式中相同。反演所得类型 2 气溶胶消光系数如图 4(b)所示,与用于模拟激光雷达距离校正信号所用的层状气溶胶消光系数廓线[见图 4(a)]很好地

吻合。反演结果验证了方程(2)式及其解(4)式的正确性。信号的模拟及其相应的反演计算表明:使用本文中的新方法[方程(1)式和(2)式及其相应的解(3)式和(4)式],类型2气溶胶($S_{\text{aer}2}=20$)能够从类型1气溶胶($S_{\text{aer}1}=10$)中分辨出来。

4 实验和数据分析

实验采用一台地基多波段激光雷达,可以同时测量空气污染物和气溶胶垂直分布廓线。激光雷达系统的发射器由 Nd:YAG 激光器抽运可调谐染料激光器组成;接收器是直径 50 cm 的牛顿望远镜。Nd:YAG 激光器重复频率是 10 Hz。染料激光器发射两个不同波长(λ_a, λ_b)的交替脉冲,这是通过倍频晶体产生的二次谐波。后向散射光由视场角为 3 mrad 的望远镜收集,准直后通过干涉滤波片后被光电倍增管(PMT)探测。一台 12 bit, 10 MHz 的瞬态数字记录仪产生数值信号,其空间分辨率为 7.5 m。在本次实验观测中,实验系统选用 446.8 nm 这一波长来测量气溶胶。

气溶胶激光雷达测量信号如图 5(a)所示。图 5(a)中 1)是由均匀背景大气气溶胶产生的距离校正信号,平滑地衰减。可以把均匀大气看作稳定的背景气溶胶。本次实验过程中,观测到一团通过激光雷达系统上方的云。图 5(a)中 2)是云散射产生的距离校正激光雷达信号。图 5(a)中 2)显示云出现在 1000~2200 m 的范围内;1000 m 以下和 2200 m 以上的信号很光滑和图 5(a)中 1)相似,这意味着 1000 m 以下和 2200 m 以上的信号是由均匀背景气溶胶散射产生的。1000~2200 m 的范围内的信号是由背景气溶胶和云共同散射产生的。因此,两种类型的气溶胶(背景气溶胶和云)的混合散射产生了激光雷达回波信号。

根据图 5(a)中 1)的数据,用方程(1)式及其解(3)式,反演得到背景气溶胶消光系数廓线。在反演过程中, $P_1(r)$ 是激光雷达回波, $S_{\text{aer}1}$ 取 10, S_{mol} 取 $8\pi/3$, β_{mol} 是标准大气后向散射系数。反演所得背景气溶胶消光系数廓线如图 5(b)中 1)所示。图 5(a)中 2)是由背景气溶胶和云两种类型气溶胶的混合体以及大气分子的共同后向散射产生的距离校正信号。用方程(2)式及其解(4)式可以反演第二类型气溶胶(云)的消光系数廓线。在反演过程中, $S_{\text{aer}2}$ 取作 20,其他的参数 $S_{\text{aer}1}, S_{\text{mol}}, \beta_{\text{mol}}$ 取值和方程(1)式及其解(3)式中一样。反演得到云的消光系数廓线如图 5(b)中 2)所示。图 5(b)中 2)显示在 0~1000 m

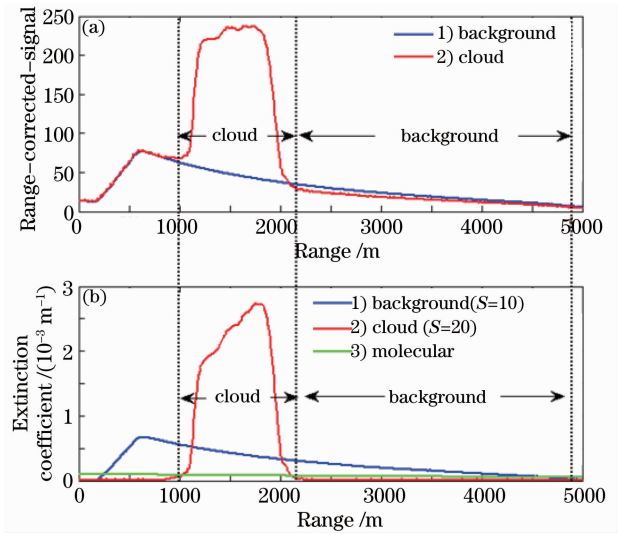


图 5 (a) 观测信号; (b) 观测信号的反演结果
Fig. 5 (a) Measuremental signals; (b) inversed extinction coefficient

范围内云的消光系数廓线很小,接近于 0。这说明在该高度范围内没有云存在,云出现在 1000~2200 m 范围内,然后在高度超过 2200 m 再次消失。图 5(b)中 1)显示在整个 0~5000 m 范围内背景气溶胶都存在。因此实验观测及其分析表明:运用该新方法[方程(1),(2)式及其解(3),(4)式]可以明显的将云从背景气溶胶中区分出来。

当有两种气溶胶混合存在时,如果不用本文中的新方法,而用传统方法反演激光雷达观测数据,反演所得结果将存在疑问。假如采用传统的 Fernald 方法,只能假设在整个范围内只有一种类型的气溶胶存在,假设 $S=10$,反演所得气溶胶消光系数廓线如图 6 中 1)所示。很明显,图 6 中 1)气溶胶消光系数廓线是不合理的。因为,在 0~1000 和 2200~5000 m 范围内测到的激光雷达信号是平滑的,这表明在这两个区间范围充斥着均匀背景的大气气溶胶;在 1000~2200 m 范围内测得激光雷达信号的形状有很多波动结构,这表明在这个区间范围里充斥着云气溶胶。实验观测信号显示在 0~1000 m 范围内充斥着的气溶胶和 1000~2200 m 范围内的不一样,但是在反演过程中因为假设只有一种类型气溶胶($S=10$)存在,所以图 6 中 1)的反演结果和真实测量信号不相符。如果假设 $S=20$,反演所得气溶胶消光系数廓线如图 6 中 2)所示。反演过程中,假设在整个范围内只有一种类型的气溶胶($S=20$)存在,反演结果表明从 0~1000 m 范围内的消光系数廓线结构和 1000~2200 m 范围内的结构完全不一样的,这明显表明在 0~1000 m 范围内与 1000~

2200 m 范围内存在完全不同的两种气溶胶。换句话说,假设在整个范围内是一种类型的气溶胶,但是反演所得廓线的形状结构表明在整个范围内存在两种类型的气溶胶,所以反演的结果与假设不符合。图 6 中 3)和 4)是通过本文中的新方法[方程(1),(2)式及其解(3),(4)式]计算出来的两种类型气溶胶(背景气溶胶 $S=10$ 和云 $S=20$)的消光系数廓线。图 6 中 3)和 4)表明,背景气溶胶和云这两种类型气溶胶是明显区分开的。图 6 中 3)表明整个范围内的消光系数廓线是平滑并随着高度增加逐渐衰减的。这意味着充斥整个测量范围的背景气溶胶是均匀的。图 6 中 4)显示云出现在 1000~2200 m 范围内,在 0~1000 m,以及 2200~5000 m 范围内基本没有云存在。因此,图 6 中 3)和 4)与真实大气状况是一致的。图 6 中 5)的指的是 3)和 4)的值的总和,在 0~1000 m 范围内和 1)基本是重合的,这是因为在 0~1000 m 范围内没有云,所以 4)的值基本是 0。然而,在 1000~2200 m 范围内 5)是远大于 1)。很明显,两种类型气溶胶消光系数总和与假设只有一种类型气溶胶存在的消光系数不一样。图 6 中 5)和 2)的比较显示:在 0~1000 m 范围内 5)的值比 2)的值小得多,在 1000~2200 m 范围内远大于 2)的值。两种类型气溶胶消光系数总和比一种类型气溶胶的消光系数小,不合理。此外,在 0~1000 m 与 2200~5000 m 范围内激光雷达距离校正信号的形状很平滑,在 1000~2200 m 范围内有许多波动的结构。很容易发现充斥在 1000~2200 m 范围的气溶胶和 0~5000 m 范围的背景气溶胶类型是不一样的,用传统 Fernald 方法反演出来的结果 1)和 2)存在疑问。实验观测数据新方法与传统

方法反演结果的比较表明:在整个激光雷达测量范围内,应该考虑两种(或者多种)类型气溶胶混合并存而不应该假设一种类型气溶胶存在。

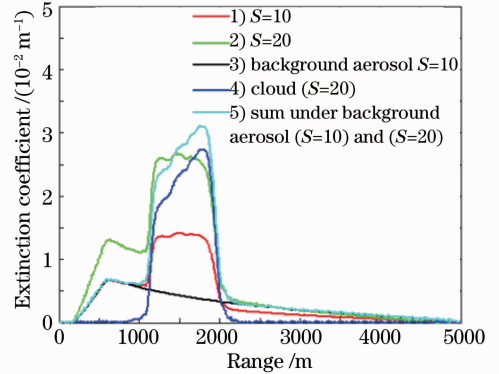


图 6 不同反演结果

Fig. 6 Different inversion results

图 7 是连续观测的 11 组实验反演结果。图 7(a)中是用 Fernald 方法反演的气溶胶消光系数,在整个反演过程中,假设只有一种气溶胶存在。从图 7(a)可以明显看出,有两个气溶胶层存在,分布在底层均匀的背景气溶胶和边界层以上的云层,从连续时间分布的廓线来看,显然有两种不同的气溶胶存在,然而在做气溶胶反演时,假设只有一种气溶胶存在,明显不合理。图 7(b)是用新方法[方程(1)式],解出的均匀连续分布的背景气溶胶消光系数廓线,从图 7(b)中可以看出,除均匀分布随高度逐渐衰减的背景气溶胶之外,不存在其他结构非均匀分布气溶胶;图 7(c)是用新方法[方程(2)式],解出的分布在边界层上部的云的消光系数,很明显,除云团出现的区域之外,消光系数明显很低,几乎可以认为是干净的空气。图 7(b)、(c)表明用本文新方法[方程(1)式

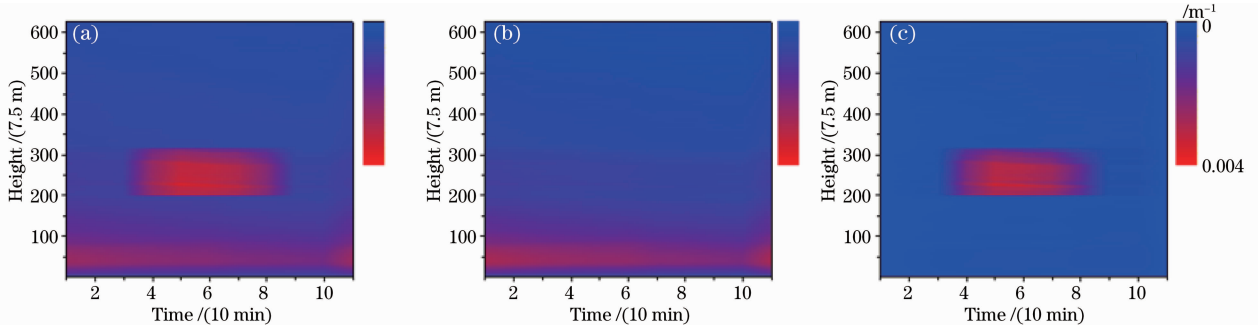


图 7 连续观测实验反演的消光系数。(a)用传统的 Fernald 反演方法,假设只有一种气溶胶存在;(b)用本文新方法,方程(1)式反演的背景气溶胶消光系数,有两种气溶胶(背景气溶胶与云层)并存;(c)用本文新方法,方程(2)式反演云消光系数

Fig. 7 Extinction coefficients inverted from the continuous measurements. (a) Using Fernald method, assuming one aerosol; (b) background aerosol, using equation (1), two kind aerosols; (c) cloud, using equation (2), two kind aerosols

和(2)式],能通过消光系数廓线的结构的差异明显地把两种不同类型的气溶胶区分开。

5 讨 论

在用本文新方法反演两种或多种气溶胶的过程中,存在着气溶胶的消光后向散射比的确定问题,理论上讲,可以根据拉曼激光的回波信号较精确地反演气溶胶后向散射系数和消光系数,在此基础上可以获得消光散射比的垂直廓线分布,这样反过来可以再结合本文的新方法,反演气溶胶的消光系数廓线。然而实际上由于拉曼激光雷达硬件系统的探测器采用光子计数技术,测量非常微弱的光子信号,在放大有用拉曼信号的同时,噪声信号也同样被放大,特别是在高空,有用拉曼雷达信号都淹没在噪声中;再者利用拉曼信号计算气溶胶后向散射和消光系数的过程中,存在微分计算,这样导致计算的结果几乎为零,使测量工作失去意义。如图 8(a)所示,用原始拉曼激光雷达(未经过处理)计算所得的消光后向散射比廓线,围绕着 0 值存在很多毫无规

则的震荡,平均值几乎为零。然而,通过把拉曼激光雷达信号经过多次平均光滑处理(用 Matlab 软件对拉曼信号进行 50 级平均光滑),除去高频噪声信号,用所得的低频拉曼信号进行后向散射系数和消光系数计算,从而得到如图 8(b)所示的消光后向散射比。可以看出在低空消光后向散射比的平均值大概是 15,高空消光后向散射比的平均值大概是 30,不同空气条件下的气溶胶观测数据,计算的结果相差很大。与本文中新方法计算所用的两种气溶胶消光后向散射比相差 5~15 左右。本文中新方法所用数据的实验观测条件是东京近海晴空大气,在实验观测过程出现云层。近海空气一般比较干净,观测所得可以认为是大气背景(本底)气溶胶。一般在市区或工业区的气溶胶污染比较严重,边界层气溶胶分布也不均匀。所以两种不同实验方法的参考及可比性,有待于在南京北郊进一步观测研究,用拉曼激光数据计算反演,光滑平均的次数越多,计算结果可能变得越平稳,然而,这样可能导致有用微弱拉曼散射信息丢失,从而引起信号失真。

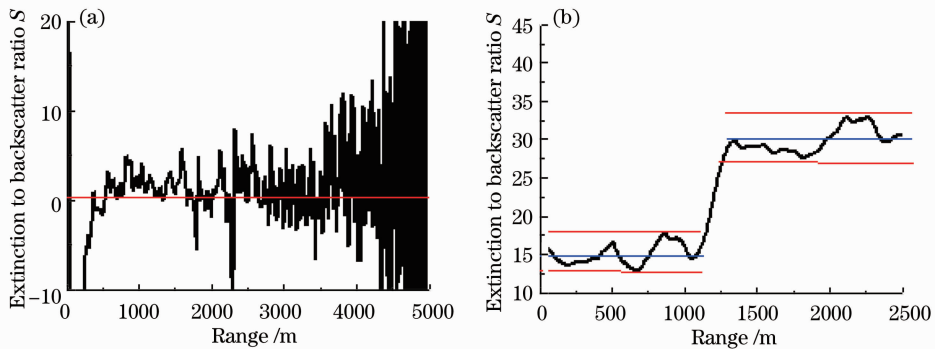


图 8 用拉曼激光测量的消光后向散射比 S 。(a)用原始拉曼激光数据计算的 S ;(b)经过多次光滑处理后的拉曼激光雷达数据计算得到的 S

Fig. 8 Extinction to backscatter ratio S calculated by Raman lidar measurements. (a) S by original Raman data; (b) S by modified Raman data

为了对比,采用 Fernald 方法,在反演计算过程中整个高度上假定一个 S 值,反演气溶胶消光系数廓线。反演结果与本文新方法反演结果不符,很难得到合理的解释。下一步将使用 Klett 法进行反演,在整层高度上假定一个 k 值。并将反演结果与前述新方法反演结果进行比对分析。

6 结 论

传统的气溶胶反演方法,Klett 和 Fernald 方法,只能反演均匀分布的一种类型气溶胶光学参数。在多种类型气溶胶混合并存的大气条件下,利

用 Klett 或 Fernald 方法反演得到的结果很难解释。本文阐述了一种利用激光雷达测量两种(多种)不同类型气溶胶混合并存时的回波信号,并反演不同类型气溶胶的光学参数的新方法。根据激光雷达信号形状,可以估计激光雷达探测的整个高度范围内的不同气溶胶类型,再根据方程(1)式和(2)式以及其解(3)和(4)式,并利用激光雷达探测数据反演得到整个高度范围内两种不同类型气溶胶的光学特性参数。模拟信号和实验观测数据及其反演结果都验证了该新方法的可行性和合理性。

参 考 文 献

- 1 J D Klett. Extinction boundary value algorithms for lidar inversion [J]. Appl Opt, 1986, 25(15): 2462–2464.
- 2 F G Fernald. Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments [J]. Appl Opt, 1984, 23(5): 652–653.
- 3 N Cao, S Li, T Fukuchi, *et al.*. Measurement of tropospheric O₃, SO₂ and aerosol from a volcanic emission event using new multi-wavelength differential-absorption lidar techniques [J]. Appl Phys B, 2006, 85(1): 163–167.
- 4 Shi Jianzhong, Cao Nianwen. Tropospheric aerosol measurements by lidar in north suburb area of Nanjing city [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(10): 100101.
施建中, 曹念文. 南京北郊对流层气溶胶激光雷达观测[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 100101.
- 5 Cao Nianwen, Shi Jianzhong, Zhang Yingying, *et al.*. Aerosol measurements by Raman-Rayleigh-Mie lidar in north suburb area of Nanjing city [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 060101.
曹念文, 施建中, 张莹莹, 等. 南京北郊气溶胶观测[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(6): 060101.
- 6 Chen Tao, Wu Decheng, Liu Bo, *et al.*. A new method for determining aerosol backscatter coefficient boundary value in the lower troposphere [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1531–1536.
陈 涛, 吴德成, 刘 博, 等. 低层大气中确定气溶胶后向散射系数边界值的新方法[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1531–1536.
- 7 Zhang Zhaoyang, Su Lin, Chen Liangfu. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0513002.
张朝阳, 苏 林, 陈良富. 中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0513002.

栏目编辑：王晓球