

# 两点标定法求解背景气溶胶 $S_a(z)$ 值的可行性研究

刘厚通<sup>1</sup> 赵建新<sup>2</sup> 莫须涛<sup>1</sup> 韩玉峰<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 安徽工业大学数理学院, 安徽 马鞍山 243002  
<sup>2</sup> 安徽工业大学后勤与基建管理处, 安徽 马鞍山 243002)

**摘要** 对两点标定法求解气溶胶消光后向散射比  $S_a(z)$  的可行性进行了研究。讨论了利用两点标定法反演气溶胶消光后向散射比的精度和两标定定点之间距离的关系: 当两点之间的距离大于 1 km 时, 利用两点标定法得到的气溶胶消光后向散射比是可靠的。对比分析了两标定定点间的距离大小及两种不同的迭代方法对两标定定点之间气溶胶消光后向散射比反演结果的影响。并对两点标定法用于气溶胶消光后向散射比反演时, 预先对反演结果进行误差估计的可行性进行了探讨。实际反演结果表明, 利用两点标定法进行气溶胶消光后向散射比的反演, 当两标定定点之间的距离大于 1 km 且标定定点的气溶胶消光系数的误差为 5% 时, 反演得到两标定定点之间气溶胶消光后向散射比的误差一般不会超过 6%。

**关键词** 大气光学; 气溶胶消光后向散射比; 两点标定法; 气溶胶消光系数; 误差

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0301001

## Feasibility Study for Acquiring $S_a(z)$ Value of Background Aerosol Using Two-Point Calibration Method

Liu Houtong<sup>1</sup> Zhao Jianxin<sup>2</sup> Mo Xutao<sup>1</sup> Han Yufeng<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Mathematics and Physics, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243002, China  
<sup>2</sup> Logistics and Capital Construction Management Department, Anhui University of Technology,  
Maanshan, Anhui 243002, China)

**Abstract** Feasibility of using two-point calibration method to acquire aerosol extinction-to-backscattering ratio is explored. Two-point calibration method is one of the important methods for acquiring aerosol extinction-to-backscattering ratio. The relationship between the distance of the two calibration points and the accuracy of aerosol extinction-to-backscattering ratio acquired by using two-point calibration method is discussed. The aerosol extinction-to-backscattering ratio obtained by using two-point calibration method is reliable when the distance between the two points is greater than 1 km. The influence of the distance between the two calibration points on the inversion results of aerosol extinction-to-backscattering ratio from one calibration point to another one is analyzed. The influence to aerosol extinction-to-backscattering ratio inversion results of two different iterative methods is discussed. The feasibility of beforehand error estimation of inversion results when two-point calibration method is used for the inversion of aerosol extinction-to-backscattering ratio is investigated. The inversion results show that the error of aerosol extinction-to-backscattering ratio between the two calibration points does not exceed 6% generally when the distance between the two calibration points is greater than 1 km and the extinction coefficient error of the calibration point is 5%.

**Key words** atmospheric optics; aerosol extinction-to-backscattering ratio; two-point calibration method; aerosol extinction coefficient; error

**OCIS codes** 010.1290; 010.1110; 010.1100

## 1 引言

激光雷达是探测气溶胶特性的主要技术工具之一<sup>[1~3]</sup>。为了从米氏散射激光雷达回波信号中获得

气溶胶的相关光学特性, 需假定气溶胶消光系数和后向散射系数之间存在一函数关系, 这种关系称为激光雷达比或气溶胶消光后向散射比  $S_a(z)$ <sup>[4,5]</sup>。

**收稿日期**: 2012-08-28; **收到修改稿日期**: 2012-10-22

**基金项目**: 国家自然科学基金(41075027)资助课题。

**作者简介**: 刘厚通(1969—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事激光雷达大气遥感方面的研究。

E-mail: liuhoutong6@163.com

不同类型气溶胶的消光后向散射比  $S_a(z)$  差别很大,气溶胶消光后向散射比  $S_a(z)$  依赖于激光发射波长、气溶胶的尺度谱分布和折射率,数值一般在  $20\sim 70$  sr 之间<sup>[6~8]</sup>。

目前,利用米氏散射激光雷达进行气溶胶探测时,气溶胶消光后向散射比  $S_a(z)$  可以依靠太阳分光光度计或光学粒子计数器辅助工具获得,也可用米氏散射-拉曼激光雷达或者高光谱分辨率激光雷达直接探测反演得到<sup>[9~12]</sup>,还可以利用双流法反演得到<sup>[12~14]</sup>,该法本质上是利用空基激光雷达和地基激光雷达同时对同一气溶胶目标进行探测得到的数据,结合边界值等条件求出  $S_a(z)$  的垂直分布。

但是在很多情况下,米氏散射激光雷达进行大气探测时没有辅助探测工具,也缺乏利用双流法进行  $S_a(z)$  反演的客观条件。到目前为止,仅靠米氏散射激光雷达探测得到的数据还不能精确获得气溶胶消光系数的垂直分布,这不仅降低了米氏散射激

光雷达的数据利用率,也限制了其应用范围。

本文将探讨利用两点标定法测量反演气溶胶消光后向散射比  $S_a(z)$  的可行性及反演精度。如果能够利用两点标定法比较精确地求出两标定点之间的  $S_a(z)$ ,利用米氏散射激光雷达数据就有可能反演得到  $S_a(z)$  的垂直分布,研究结果将对米氏散射激光雷达的推广应用产生重要的影响<sup>[15]</sup>。

## 2 理论基础

### 2.1 反演所用的公式及相关说明

米氏散射激光雷达方程可以表示为<sup>[16]</sup>

$$P(z) = \frac{C\beta(z) \exp\left[-2\int_0^z \alpha(z) dz\right]}{z^2}. \quad (1)$$

根据(1)式可以得到激光雷达距离校正信号(PRR)的数学表达式

$$X(z) = P(z) \cdot z^2 = C\beta(z) \exp\left[-2\int_0^z \alpha(z) dz\right] = C[\beta_a(z) + \beta_m(z)] \exp\left\{-2\int_0^z [\alpha_a(z) + \alpha_m(z)] dz\right\}, \quad (2)$$

式中  $C$  为激光雷达系统常数; $P(z)$  为米氏散射激光雷达后向散射回波信号; $\alpha(z)$  为高度  $z$  处的大气消光系数且  $\alpha(z) = \alpha_m(z) + \alpha_a(z)$ ,其中  $\alpha_a(z)$ 、 $\alpha_m(z)$  分别为高度  $z$  处气溶胶粒子、大气分子的消光系数; $\beta(z)$  为高度  $z$  处的大气后向散射系数且  $\beta(z) = \beta_a(z) + \beta_m(z)$ ,其中  $\beta_a(z)$ 、 $\beta_m(z)$  分别为高度  $z$  处气溶胶粒子、大气分子的后向散射系数; $\beta_m(z)$  的有关表达式见文献[3]。

在两点标定法中,本文采用 Fernald<sup>[4]</sup> 后向积分公式迭代反演两标定点间的  $S_a(z)$  值。对于 532 nm 波长,如果事先已知某一高度  $z_c$  处(标定高度)大气气溶胶和空气分子的消光系数(标定值),Fernald<sup>[4]</sup> 给出了  $z_c$  以下各高度该波长的气溶胶消光系数(后向积分):

$$\alpha_a(z) = -\frac{S_a(z)}{S_m} \alpha_m(z) + \frac{X(z) \exp\left[2\left(\frac{S_a(z)}{S_m} - 1\right) \int_z^{z_c} \alpha_m(z) dz\right]}{\frac{X(z_c)}{\alpha_a(z_c) + \frac{S_a(z)}{S_m} \alpha_m(z_c)} + 2 \int_z^{z_c} X(z) \exp\left[2\left(\frac{S_a(z)}{S_m} - 1\right) \int_z^{z_c} \alpha_m(z') dz'\right] dz}. \quad (3)$$

为了表述方便,令

$$D = \alpha_a(z_c) + \frac{S_a(z)}{S_m} \alpha_m(z_c), \quad (4)$$

而  $z_c$  以上各高度该波长的气溶胶消光系数为(前向积分):

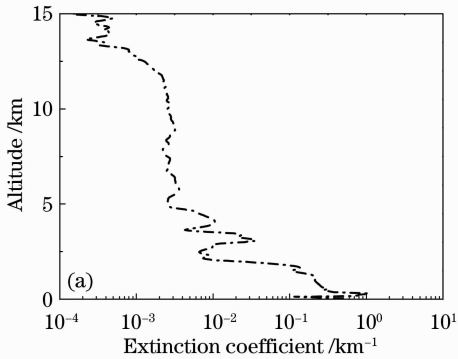
$$\alpha_a(z) = -\frac{S_a(z)}{S_m} \alpha_m(z) + \frac{X(z) \exp\left[2\left(\frac{S_a(z)}{S_m} - 1\right) \int_{z_c}^z \alpha_m(z) dz\right]}{\frac{X(z_c)}{\alpha_a(z_c) + \frac{S_a(z)}{S_m} \alpha_m(z_c)} - 2 \int_{z_c}^z X(z) \exp\left[2\left(\frac{S_a(z)}{S_m} - 1\right) \int_{z_c}^z \alpha_m(z') dz'\right] dz}, \quad (5)$$

式中  $X(z) = P(z)z^2$  为米氏散射激光雷达距离校正信号, $z_c$  为标定高度, $S_a(z) = \alpha_a(z)/\beta_a(z)$  为高度  $z$  处的气溶胶消光后向散射比, $S_m$  为分子的消光后向散射比, $S_m = \alpha_m(z)/\beta_m(z) = 8\pi/3$ 。

## 2.2 反演所用的数据

对利用两点标定法反演得到的  $S_a(z)$  的准确度进行定量分析,需要事先获得所探测气溶胶的消光系数及  $S_a(z)$  的真实值,但是根据米氏散射激光雷达探测数据进行气溶胶消光系数等相关气溶胶参数反演时,  $S_a(z)$  的真实值往往是未知的。

本文分析所用的数据(气溶胶消光系数)如图 1(a)所示,该数据来自中国科学院安徽光学精密机械研究所大气探测激光雷达实验室偏振-米氏散射激光雷达



(PML),原始数据的有效探测高度为 30 km。根据图 1(a)中的气溶胶消光系数,假定此时气溶胶消光后向散射比为 50 sr,根据(2)式模拟得到 7.5~9.5 km 高度范围内,利用米氏散射激光雷达对该气溶胶进行探测得到的距离校正信号,如图 1(b)所示,这样就获得了气溶胶消光系数和  $S_a(z)$  等参数均已知的“大气”。模拟激光雷达距离校正信号所用的消光系数和  $S_a(z)$  作为各自的真实值,利用此“大气”能够定量分析两点标定法反演得到的  $S_a(z)$  的误差。

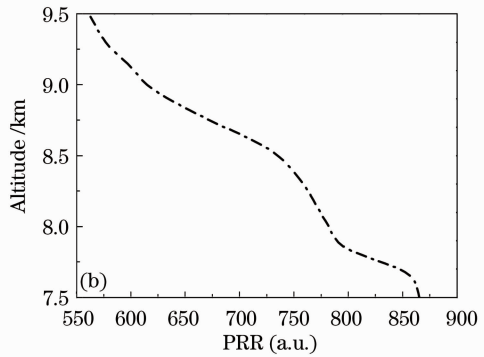


图 1 (a)气溶胶消光系数及(b)相应的激光雷达距离校正信号

Fig. 1 (a) Aerosol extinction coefficient and (b) corresponding PRR

## 2.3 两点标定法求解 $S_a(z)$ 简介

利用两点标定法求解气溶胶消光后向散射比  $S_a(z)$ ,是在反演路径上找两个反演标定点,要求这两个标定点的消光系数和  $S_a(z)$  均能求出,以其中一个点作为反演的标定点,另一点为迭代反演限制点,迭代算出两标定点间的  $S_a(z)$  值(迭代变量),此值作为两标定点之间气溶胶消光后向散射比。

经过实际反演发现:利用两点标定法求解两标定点之间的  $S_a(z)$  值时,(4)式中的  $S_a(z)$  对计算某高度范围内(如 7.5~9.5 km)的气溶胶消光后向散射比影响很大。当标定点的气溶胶消光后向散射比能够较准确地计算出来时,假定两标定点的气溶胶消光后向散射比等于两标定点之间的气溶胶消光后向散射比,在迭代计算中就可以利用标定值算出的标定点的气溶胶消光后向散射比代替  $D$  项中的  $S_a(z)$ 。为了讨论方便,把  $D$  项中的  $S_a(z)$  叫做  $S_a(z_0)$ ,并把  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  用标定点的气溶胶消光后向散射比代替、不参加迭代反演的方法叫做“ $S_a(z_0)$ 不参加迭代反演”, $D$ 项中的  $S_a(z_0)$ 和(3)式中的其他  $S_a(z)$ 一样参加迭代反演的方法叫做“ $S_a(z_0)$ 参加迭代反演”。

实际反演表明:利用“ $S_a(z_0)$ 不参加迭代反演”和“ $S_a(z_0)$ 参加迭代反演”这两种方法得到的两标

定点之间  $S_a(z)$  的误差不一样,有时甚至相差很大,具体原因有待探讨。

## 3 两点标定法反演 $S_a(z)$ 的精度与两点之间距离的关系

### 3.1 较小的标定值误差情况下反演结果分析

#### 3.1.1 两标定点的距离为 0.5 km

1)  $D$ 项中的  $S_a(z_0)$ 值参加迭代。

以图 1中 7.5~8.0 km 高度范围内的数据作为研究对象。当标定点选在 7.5~8.0 km 高度段的上边界(8.0 km)时,假定两标定点之间  $S_a(z)$  的真实值为 50 sr。选用图 1(a)中的数据作为气溶胶消光系数真实值,赋予标定点的消光系数 5%的误差且选择 8.0 km 处为反演起点,利用两点标定法中的“ $S_a(z_0)$ 参加迭代反演”法迭代反演得到两标定点之间的  $S_a(z)$  值为 62.5 sr,  $S_a(z)$  值的绝对误差为 12.5 sr,相对误差为 25%。应该说反演得到两标定点间  $S_a(z)$  的误差是相当大的。

实际上,当  $D$ 项中的  $S_a(z_0)$ 参加迭代时,这组激光雷达信号不适合利用两点标定法求解两标定点间的  $S_a(z)$  值,标定值存在 5%误差和不存在误差时迭代反演得到的气溶胶消光系数廓线如图 2(a)所示。

2)  $D$ 项中的  $S_a(z_0)$ 值不参加迭代。

如果两标定点的气溶胶消光系数和后向散射系数已知,取两标定点间  $S_a(z)$  的真实值为 50 sr。采用“ $S_a(z_0)$  不参加迭代反演”的方法反演得到 7.5~8.0 km 之间的  $S_a(z)$  值;反演中以标定点的气溶胶消光后向散射比代替  $D$  项中的  $S_a(z_0)$ 。当标定值存在 5% 误差且  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  不参加迭代时,反演

得到两标定点间的  $S_a(z)$  值为 44.39 sr,其绝对误差为 5.61 sr,相对误差为 11.22%。图 2(b)是标定值存在 5% 误差且迭代收敛时,利用“ $S_a(z_0)$  不参加迭代反演”法反演得到的气溶胶消光系数廓线与标定值不存在误差时气溶胶消光系数廓线的对比。

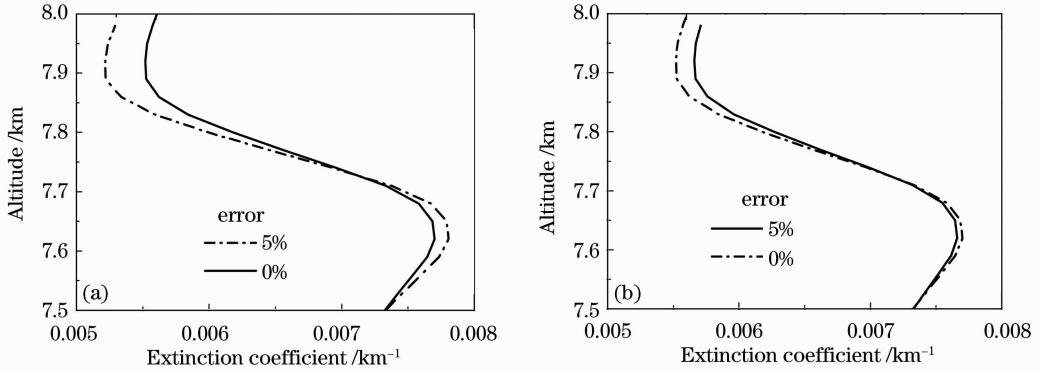


图 2 标定点误差为 5%,两点间距离为 0.5 km 时两点标定法反演得到的气溶胶消光系数廓线。(a)  $S_a(z_0)$  值参加迭代; (b)  $S_a(z_0)$  值不参加迭代

Fig. 2 Aerosol extinction coefficient curves obtained by using two-point calibration method when the error of calibration points is 5% and the distance between two points is 0.5 km. (a)  $S_a(z_0)$  is iterated; (b)  $S_a(z_0)$  is not iterated

可以看出,当两标定点之间的距离为 0.5 km 时,不论  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  参加迭代还是不参加迭代,利用两点标定法反演得到  $S_a(z)$  的误差都是相当大的。如果  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  参加迭代,将会加大两标定点之间  $S_a(z)$  的反演误差。

为 50 sr,当标定值存在 5% 的误差时,对于图 1(b) 激光雷达距离校正信号,利用 Fernald 后向积分(3) 式迭代反演得到的  $S_a(z)$  值为 65.5 sr,其绝对误差为 15.5 sr,相对误差为 31%。图 3(a)为标定值存在 5% 误差且迭代收敛时,利用“ $S_a(z_0)$  参加迭代反演”法得到的气溶胶消光系数廓线与标定值不存在误差时气溶胶消光系数廓线的对比。

### 3.1.2 两标定点的距离为 1 km

#### 1) $D$ 项中的 $S_a(z_0)$ 参加迭代。

#### 2) $D$ 项中的 $S_a(z_0)$ 不参加迭代。

选择图 1 中 7.5~8.5 km 高度段的气溶胶作为研究对象,在此高度段内将图 1(a)中的气溶胶消光系数作为气溶胶消光系数的真实值。如果  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  参加迭代且待反演气溶胶  $S_a(z)$  的真实值

如果两标定点之间的距离为 1 km,选取图 1 中 7.5~8.5 km 高度段内的数据作为研究对象,当  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  不参加迭代且标定点的消光系数误

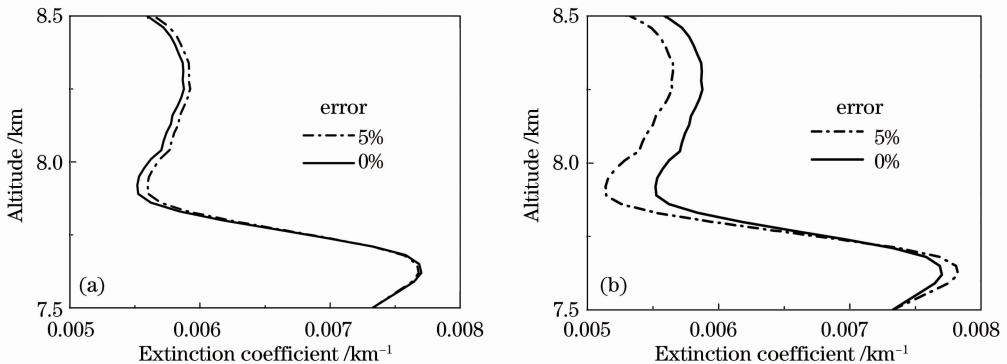


图 3 标定点误差为 5%,两点间距离为 1 km 时两点标定法反演得到气溶胶消光系数的曲线。(a)  $S_a(z_0)$  值参加迭代; (b)  $S_a(z_0)$  值不参加迭代

Fig. 3 Aerosol extinction coefficient curves obtained by using two-point calibration method when the error of calibration points is 5% and the distance between two points is 1 km. (a)  $S_a(z_0)$  is iterated; (b)  $S_a(z_0)$  is not iterated

差为 5% 时,如果两标定点之间  $S_a(z)$  的真实值为 50 sr,根据图 1(b) 中的激光雷达距离校正信号反演得到的  $S_a(z)$  值为 46.98 sr,其绝对误差为 3.02 sr,相对误差为 6.04%。图 3(b) 为标定点的气溶胶消光系数存在误差和不存在误差时反演得到的气溶胶消光系数廓线对比。

可以看出,对于本组数据,如果  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  不参加迭代,反演得到的两标定点之间  $S_a(z)$  的误差基本能够满足反演精度要求,但如果  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  参加迭代,反演得到的两标定点之间  $S_a(z)$  的误差会很大。

### 3.1.3 两标定点的距离为 2 km

当两标定点之间的距离为 2 km(7.5~9.5 km) 时,采用图 1(a) 中的气溶胶消光系数作为本高度段气溶胶消光系数的真实值,图 1(b) 中相应高度段的数据作为待反演的激光雷达距离校正信号,50 sr 作为本高度段  $S_a(z)$  的真实值。选择 9.5 km 处作为反演起点,赋予标定点气溶胶消光系数 5% 的误差,如果  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  参加迭代,利用两点标定法反演得到两标定点之间的  $S_a(z)$  值为 50.3 sr,其绝对误差为 0.3 sr,相对误差为 0.6%,迭代收敛时气溶胶消光系数廓线如图 4 中 a 线所示。

$D$  项中的  $S_a(z_0)$  不参加迭代且气溶胶消光系数及消光后向散射比真实值同上段,选择 9.5 km 处作为反演起点,根据(3) 式利用两点标定法反演得到两标定点之间的  $S_a(z)$  值为 46.94 sr,  $S_a(z)$  的绝对误差为 3.06 sr,相对误差为 6.12%。迭代反演得到的气溶胶消光系数廓线如图 4 中 c 线表示;图中 b 线为气溶胶消光系数真实值。

可以看出,对于图 1 中数据,当两标定点之间的距离为 1 km 以上且标定值存在 5% 误差时,  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  不参加迭代时反演得到两标定点间  $S_a(z)$

的误差基本是稳定的,在 6% 左右;但是  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  参加迭代时反演得到的两标定点之间的  $S_a(z)$  值误差有时很大,有时很小。

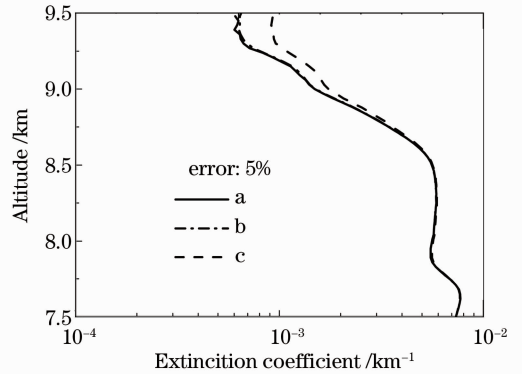


图 4 两种方法反演得到的气溶胶消光系数廓线比较分析

Fig. 4 Comparative analysis of aerosol extinction coefficient profiles obtained by using two different methods

### 3.2 较大的标定值误差情况下 $S_a(z)$ 反演精度分析

在米氏散射激光雷达实际定标中,标定值的误差可能达到 100%,有时甚至更高。利用两点标定法反演  $S_a(z)$  值时,选择误差较大的标定值进行分析,有助于了解两点标定法在实际反演  $S_a(z)$  值过程中对标定值误差的容忍度,也能够充分论证两点标定法迭代反演  $S_a(z)$  的可行性。

选择图 1(a)、(b) 中 8.5~9.5 km 高度范围的数据作为研究对象。图 5(a) 是当标定值分别存在 0%、50% 和 100% 误差,利用“ $S_a(z_0)$  参加迭代反演”的方法对图 1(b) 中的激光雷达距离校正信号进行反演得到的气溶胶消光系数曲线,选择气溶胶消光后向散射比的真实值为 50 sr。实际反演结果表明:当标定值分别存在 50%、100% 误差时,利用“ $S_a(z_0)$  参加迭代反演”法反演得到的  $S_a(z)$  分别为 45.9 sr 和 41.85 sr,

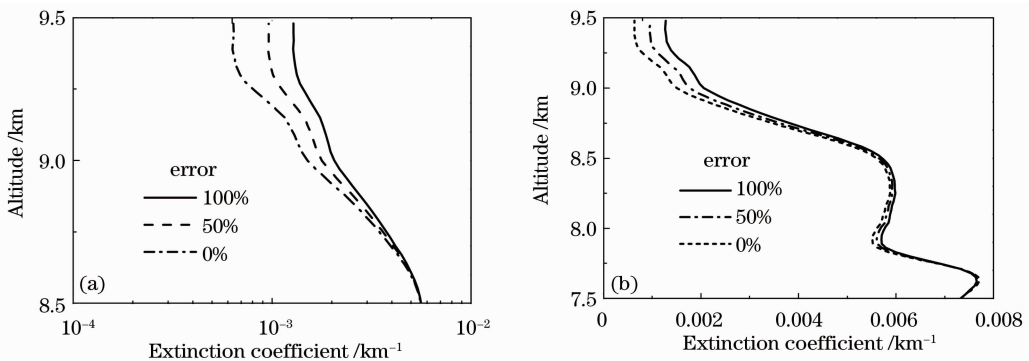


图 5 大的标定值误差下两点标定法反演  $S_a(z_0)$  值实例分析,  $S_a(z_0)$  参加迭代。(a) 8.5~9.5 km; (b) 7.5~9.5 km  
Fig. 5 Examples of  $S_a(z)$  inversion when big calibration error exists in two-point calibration method.  $S_a(z_0)$  is iterated.  
(a) 8.5~9.5 km; (b) 7.5~9.5 km



其绝对误差分别为 4.1 sr 和 8.15 sr。

图 5(b)是在 7.5~9.5 km 的高度范围内,当标定值误差分别为 0%、50%和 100%且  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  参加迭代,迭代收敛时得到的气溶胶消光系数廓线。当标定值分别存在 50%和 100%的误差时, $S_a(z)$  的反演值分别为 46.6 sr 和 43 sr,其绝对误差分别为 3.4 sr 和 7 sr。可以看出在这两种情况下即使标定值存在较大的误差,也能够较准确地得到  $S_a(z)$  值。

当  $S_a(z_0)$  不参加迭代且标定值分别存在 100%、200%的误差时,利用图 1 中相应高度段内的数据反演得到的两标定点间的  $S_a(z)$  误差太大,说明用两点标定法求解本组数据的  $S_a(z)$  时, $S_a(z_0)$  不参加迭代的方法不可行。

利用两点标定法求解  $S_a(z)$  值时,有时  $S_a(z)$  的反演结果比较准确,但也经常遇到  $S_a(z)$  反演值误差较大的情况。在标定值存在较大误差的情况下用两点标定法求解  $S_a(z)$  值, $S_a(z_0)$  一般需要参加迭代反演。如果  $S_a(z_0)$  不参加迭代,那么  $S_a(z_0)$  的值只能根据标定值获得,而大的标定值误差必然会导致标定点的气溶胶消光后向散射比产生较大误差,从而导致  $S_a(z_0)$  产生较大误差。大的  $S_a(z_0)$  误差不但影响所求高度范围内  $S_a(z)$  的反演精度,甚至还会出现迭代反演不收敛的情况,使整个迭代计算过

程无法完成。

## 4 $S_a(z)$ 误差估计的可行性

### 4.1 标定值误差较小的情况下 $S_a(z)$ 误差估算的可行性

在利用两点标定法求解两标定点之间的  $S_a(z)$  值时,怎样判断  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  是否应该参加迭代,这实际上是一个误差估算的问题,也就是如果标定点的气溶胶消光系数存在一定的误差,在已存在误差的标定值上再赋予其一定的误差,能否较为准确地判断利用两点标定法反演得到的两标定点之间  $S_a(z)$  误差的大小。

利用图 1 中的数据作为研究对象,以标定点之间的距离为 2 km 为例进行分析,当  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  不参加迭代时,若标定点的消光系数存在 5% 误差,迭代反演得到两标定点间的  $S_a(z)$  值为 46.94 sr;如果标定点的消光系数存在 10% 的误差,利用图 1(b)的激光雷达距离校正信号迭代反演得到两标定点间的  $S_a(z)$  值为 43.93 sr。标定值不存在误差及分别存在 5%和 10%误差时迭代反演得到的气溶胶消光系数廓线对比如图 6(a)所示。

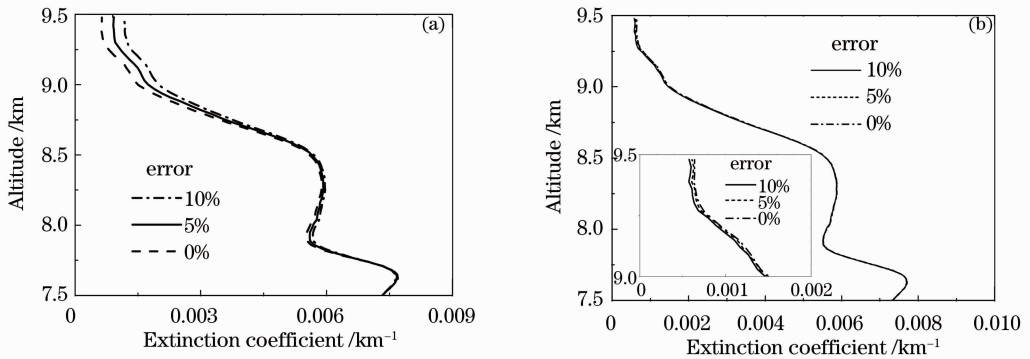


图 6 两种方法反演得到的气溶胶消光系数廓线比较分析。(a)  $S_a(z_0)$  值不参加迭代; (b)  $S_a(z_0)$  值参加迭代

Fig. 6 Comparative analysis of aerosol extinction coefficient profiles obtained by using two different methods.

(a)  $S_a(z_0)$  is not iterated; (b)  $S_a(z_0)$  is iterated

如果标定点的消光系数已存在 5% 的误差,当  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  不参加迭代时,利用两点标定法反演得到两标定点之间  $S_a(z)$  的“真实值”应为 46.94 sr;在此误差的基础上再赋予标定值 5% 的误差(这时标定值总的误差为 10%),则得到两标定点之间  $S_a(z)$  值的绝对误差为 3.01 sr(即 46.94 sr 与 43.93 sr 之差),相对误差为 6.412%(绝对误差与“真实值”46.94 sr 之比)。

如果标定点消光系数不存在误差,赋予标定值 5% 的误差,利用两点标定法反演得到两标定点之间  $S_a(z)$  值的绝对误差为 3.06 sr(即 50 sr 与 46.94 sr 之差),相对误差为 6.12%。可以看出,当利用两点标定法求解两标定点间的  $S_a(z)$  时,即使标定值存在一定误差,用误差估算的方法也能够较准确地判断两标定点间  $S_a(z)$  反演误差的大小。

如果  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  参加迭代反演,当标定值

存在 5% 的误差时,根据图 1(b)的激光雷达距离校正信号反演得到两标定点之间的  $S_a(z)$  值为 50.3 sr;如果标定值存在 10% 的误差,反演得到两标定点之间的  $S_a(z)$  值为 50.6 sr。

假定标定值已存在 5% 的误差,在此基础上给标定值附加 5% 的误差(实际上标定值总误差为 10%),  $S_a(z_0)$  参加迭代时,利用两点标定法反演得到两标定点之间  $S_a(z)$  的“真实值”应为 50.3 sr,那么得到“标定值存在 5% 误差”时两标定点之间的  $S_a(z)$  为 50.6 sr,其“绝对误差”为 0.3 sr,“相对误差”为 0.596%。标定值不存在误差及分别存在 5% 和 10% 误差时反演得到的气溶胶消光系数廓线如图 6(b)所示。

如果标定值不存在误差,当赋予标定值 5% 的误差时,反演得到两标定点之间  $S_a(z)$  的绝对误差为 0.3 sr,相对误差为 0.6%。

也就是说,如果标定值已存在 5% 的误差,在误差估算时,在此误差的基础上也能相对准确地得到两标定点之间  $S_a(z)$  误差的大小,准确地判断利用两点标定法反演得到的  $S_a(z)$  的精度。

实际反演时,假定标定点的气溶胶消光系数存在一定的误差,然后分别让  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  参加迭代及不参加迭代,比较反演得到的两标定点之间  $S_a(z)$  值的误差。如果  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  参加迭代时反演得到的  $S_a(z)$  值的误差小于  $S_a(z_0)$  不参加迭代时反演得到的  $S_a(z)$  值的误差,那么就采用  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  参加迭代的方法反演两点之间的  $S_a(z)$  值;反之,则采用  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  不参加迭代的方法反演两点之间的  $S_a(z)$  值。

#### 4.2 大的标定值误差情况下 $S_a(z)$ 反演误差估算的可行性

从图 5(a)中的反演结果可以看出,利用两点标定法求解两标定点间的  $S_a(z)$ ,当标定值误差由 50% 变为 100% 时,反演得到  $S_a(z)$  的绝对误差由 4.1 sr 增大到 8.15 sr。

在利用两点标定法迭代反演两标定点之间的  $S_a(z)$  的过程中,当标定值存在较大误差时,在标定值误差和  $S_a(z)$  的反演误差之间可能也有类似的比例关系。选择图 1 中的数据作为研究对象,在 7.5 ~ 9.5 km 高度范围内,当标定点存在 50% 误差时,反演得到  $S_a(z)$  的绝对误差为 3.4 sr,如果根据标定值误差和  $S_a(z)$  的反演误差之间的比例关系来推断,当标定值误差为 100% 和 200% 时,反演得到的  $S_a(z)$  的绝对误差应为 6.8 sr 和 13.6 sr;实际反演表明:

当标定值误差分别存在 100% 和 200% 的误差时,反演得到的  $S_a(z)$  的绝对误差分别为 7 sr 和 14.35 sr,和根据标定值误差估算得到的  $S_a(z)$  的误差值基本相符。

大量反演实例表明,大的边界值误差情况下利用两点标定法求解  $S_a(z)$  时,反演得到的  $S_a(z)$  的误差一般能够根据标定值误差估算得到。这为依据标定值的误差正确估算  $S_a(z)$  的反演误差提供了方法上的支持,也避免了两点标定法用于  $S_a(z)$  反演时反演结果误差较大的情况发生,保证了  $S_a(z)$  反演结果的精度。

利用两点标定法迭代反演  $S_a(z)$  时,可以先假定标定值存在较大的误差,估算出  $S_a(z)$  可能的误差值。如果估算出的  $S_a(z)$  的误差值在反演精度允许的范围之内,就采用两点标定法进行计算;如果估算出的  $S_a(z)$  误差超出反演精度的要求,则不用两点标定法进行求解。这也是两点标定法能够用于求解  $S_a(z)$  的主要原因之一。

## 5 结 论

实际反演表明:

1) 利用两点标定法求解气溶胶消光后向散射比  $S_a(z)$  值时,两点之间的距离一般要大于 1 km,因为两点之间的距离过小可能会造成  $S_a(z)$  值较大的反演误差;

2) 在编写程序时,可以假设标定点的消光系数存在一定的误差,分别利用  $D$  项中的  $S_a(z_0)$  参加迭代和不参加迭代两种方法得到  $S_a(z)$  的误差,然后选择  $S_a(z)$  误差较小的反演方法求解两点之间的  $S_a(z)$  值。

本文结论对米氏散射激光雷达的推广应用有较大的理论参考价值和实际意义。在激光雷达探测路径上,标定点的消光系数或后向散射系数有很多方法可以求出,如果 2 km 以内的两点之间的  $S_a(z)$  能够利用两点标定法精确求出,就能利用米氏散射激光雷达数据相对准确地求出  $S_a(z)$  的垂直分布廓线,这对利用米氏散射激光雷达数据反演气溶胶消光特性的垂直分布具有重要的现实意义和经济价值。

## 参 考 文 献

- Zhou Jun, Yue Guming, Jin Chuanjia et al.. Two-wavelength Mie lidar for monitoring of tropospheric aerosol [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(10): 1412~1417
- 周 军, 岳古明, 金传佳等. 探测对流层气溶胶的双波长米氏散

- 射激光雷达[J]. 光学学报, 2000, **20**(10): 1412~1417
- 2 Hu Shunxing, Hu Huanling, Wu Yonghua *et al.*. L625 differential absorption lidar system for tropospheric ozone measurements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 597~601  
胡顺星, 胡欢陵, 吴永华 等. L625 差分吸收激光雷达探测对流层臭氧[J]. 光学学报, 2004, **24**(5): 597~601
- 3 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
- 4 F. G. Fernald. Analysis of atmospheric lidar observation; some comments[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652~653
- 5 J. D. Klett. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(2): 211~220
- 6 Tamio Takamura, Yasuhiro Sasano, Tadahiro Hayasaka. Tropospheric aerosol optical properties derived from lidar, sun photometer, and optical particle counter measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(30): 7132~7140
- 7 Y. Sasano, H. Nakane. Significance of the extinction/backscatter ratio and the boundary value term in the solution for the two-component lidar equation[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(1): 11~13
- 8 J. Ackermann. The extinction-to-backscatter ratio of tropospheric aerosol: a numerical study [J]. *Atmos. Ocean. Technol.*, 1998, **15**(4): 1043~1050
- 9 J. W. Hair, C. A. Hostetler, A. L. Cook *et al.*. Airborne high spectral resolution lidar for profiling aerosol optical properties[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(36): 6734~6752
- 10 M. Esselborn, M. Wirth, A. Fix *et al.*. Airborne high spectral resolution lidar for measuring aerosol extinction and backscatter coefficients[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(3): 346~358
- 11 A. Ansmann, M. Riebesell, C. Weitkamp. Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(13): 746~748
- 12 G. J. Kunz. Bipath method as a way to measure the spatial backscatter and extinction coefficients with lidar [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(5): 794~795
- 13 H. G. Hughes, M. R. Paulson. Double-ended lidar technique for aerosol studies[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(11): 2273~2278
- 14 X. Wang, M. G. Frontoso, G. Pisani *et al.*. Retrieval of atmospheric particles optical properties by combining ground-based and spaceborne lidar elastic scattering profiles[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(11): 6734~6743
- 15 T. Takamura, Y. Sasano. Ratio of aerosol backscatter to extinction coefficients as determined from angular scattering measurements for use in atmospheric lidar applications[J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1987, **19**(5): 293~302
- 16 P. B. Russell, T. J. Swissler, M. P. McCormick. Methodology for error analysis and simulation of lidar aerosol measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(22): 3783~3797

栏目编辑: 王晓琰