

Fernald 前向积分用于机载激光雷达气溶胶后向散射系数反演的理论研究*

刘厚通¹⁾²⁾ 陈良富¹⁾ 苏林^{1)†}

1) (中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

2) (安徽工业大学数理学院应用物理系, 马鞍山 243002)

(2010年8月5日收到; 2010年9月2日收到修改稿)

初步反演结果表明, Fernald 前向积分法 (FFIM) 能够用于机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数的反演, 但相应的理论解释未见国内外相关文献报道. 根据合肥地基大气探测激光雷达 2008 年 2 月 27 日的探测数据模拟得到的机载激光雷达数据, 对 FFIE 用于机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数的反演结果进行了定量分析, 分析表明: 当反演标定点的高度选在 10 km 左右时, FFIM 能够用于机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数反演的主要原因有 3 个: 1) Fernald 前向积分方程 (FFIE) 分母中两项的差值一般远大于零, 这决定了 FFIM 应用于机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数反演时, 反演误差不会无限大而且反演结果不会出现负值; 2) 标定值误差为 100% 时, 在整个反演过程中误差项的值仅变化了 0.006, 是标定值没有误差时分母值的 0.6%; 3) FFIE 的标定项中分子的后向散射系数占主导地位, 标定点的气溶胶后向散射系数变化较大的值, 对整个标定项的值影响却很小. 研究表明, 上疏下密的大气结构和较高的标定位置是 FFIM 能够用于机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数反演的根本原因.

关键词: 大气光学, Fernald 前向积分法, 机载大气探测激光雷达, 气溶胶后向散射系数

PACS: 42. 68. Wt, 42. 79. Qx, 42. 68. Jg

1. 引言

激光雷达大气探测具有较高的空间分辨率、探测灵敏度和抗干扰能力, 其应用涉及科学研究、军事工程和国民经济的各个领域, 特别是在气象探测方面得到了尤为广泛的应用^[1-3]. 它可以用来测量气溶胶、云、能见度、大气成分、空中风场、大气密度、温度和湿度的变化, 能够对城市上空环境污染物的扩散、沙尘暴过程进行有效的监测.

目前, 发展以大气环境探测为目的的机载激光雷达是激光雷达技术的发展趋势, 属于航空主动遥感技术的前沿. 由于机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数反演的标定点一般选在相应的飞机平台附近, 如果用 Fernald 前向积分法 (FFIM) 进行气溶胶后向

散射系数的反演, 应该考虑 FFIM 是否可行的问题. 但到目前为止, FFIM 能否用于机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数反演一直是一个有争议的课题, 国内外有的学者为了避开用 FFIM 反演机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数, 采用 Fernald 迭代后向积分法进行机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数的反演, 但是 Fernald 迭代后向积分法反演步骤多, 反演程序比较复杂^[4]; 有的学者利用 FFIM 和其他反演方法进行对比反演研究, 但只是把 FFIM 和其他反演方法用于机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数反演得到的结果进行了对比, 没有从理论上说明 FFIM 能够应用于机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数反演的原因^[5].

初步反演结果表明: FFIM 能够用来反演机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数, 而且反演结

* 中国博士后科学基金 (批准号: 20100470601)、遥感科学国家重点实验室自由探索基金、国家自然科学基金 (批准号: 41075027) 和国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB950801) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: sulin@irsa.ac.cn

果的误差幅值一般在反演精度允许的范围内^[6]. 对 FFIM 的误差发散特性, 国内外学者针对地基大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数的反演做过理论分析, 但对 FFIM 用于机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数反演方面的理论研究, 却未见相关文献报道.

本文对 FFIM 用于机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数反演的理论基础进行探讨, 就大气模式和标定点高度对气溶胶后向散射系数反演误

差的影响进行定量分析.

2. 理论基础

2.1. FFIM 的数学表达式

用于机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数反演的 Fernald 前向积分方程 (FFIE) 的数学表达式为^[7]

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

其中 $\beta_1(r)$, $\beta_2(r)$ 分别是气溶胶粒子、大气分子的后向散射系数 ($\text{km}^{-1} \text{sr}^{-1}$), S_1 和 S_2 分别是气溶胶粒子和大气分子的消光后向散射比, $X(r) = P(r)r^2$, r 为激光雷达激光发射口到探测点的距离, r_c 为标定点到激光雷达激光发射口的距离.

为了讨论方便, FFIM 中的各项设为

$$a = X(r) \exp\{-2(S_1 - S_2) \int_{r_c}^r \beta_2(r) dr\}, \quad (2)$$

$$b = 2S_1 \int_{r_c}^r X(r) \exp\{-2(S_1 - S_2) \times \int_{r_c}^r \beta_2(r') dr'\} dr, \quad (3)$$

$$c = \frac{X(r_c)}{\beta_1(r_c) + \beta_2(r_c)}. \quad (4)$$

这样, FFIE 的数学表达式变为

$$\beta = \frac{a}{c - b}. \quad (5)$$

2.2. 532 和 1064 nm 的大气模式

高度 Z 处 532 和 1064 nm 气溶胶粒子和大气分子后向散射系数模式分别为^[8]

$$\beta_1(Z) = (2.47 \times 10^{-3}) \exp(-Z/2) + 5.13 \times 10^{-6} \times \exp(-(Z - 20)^2/36) \frac{532}{\lambda}, \quad (6)$$

$$\beta_2(Z) = 1.54 \times 10^{-3} \left(\frac{532}{\lambda}\right)^4 \exp(-Z/7). \quad (7)$$

532 和 1064 nm 分子和气溶胶后向散射系数模式廓线如图 1 所示.

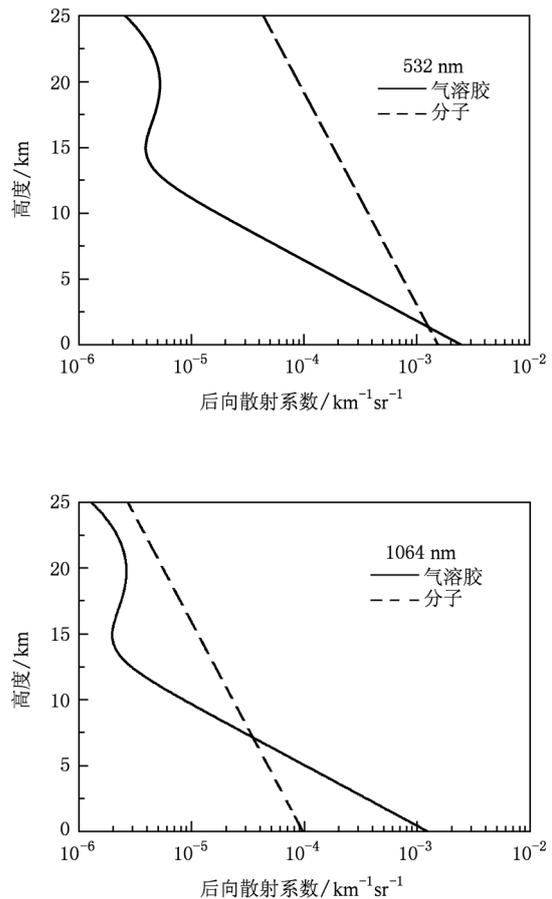


图 1 气溶胶和分子的后向散射系数(模式大气)

3. FFIM 能够用于机载激光雷达气溶胶后向散射系数反演的原因

3.1. FFIM 用于机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数的反演

我国即将制造的机载双波长偏振激光雷达预计飞行高度是 10 km, 因为缺乏 10 km 高度左右的机载大气探测激光雷达实测数据, 本文利用模拟的机载大气探测激光雷达回波信号, 验证 FFIM 能否用于在 10 km 高度左右进行大气探测的机载激光雷达气溶胶后向散射系数的反演.

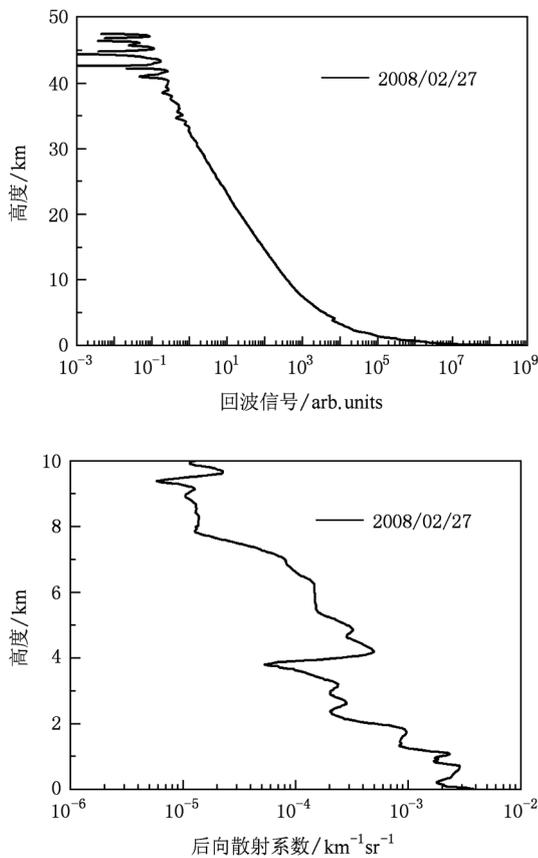


图 2 用于模拟机载激光雷达信号的地基大气探测激光雷达信号及后向散射系数

3.1.1. 反演步骤及结果

利用合肥地基双波长米散射激光雷达 2008 年 2 月 27 日探测得到的回波信号和用 Fernald 方法处理该回波信号得到的气溶胶后向散射系数(图 2), 模拟得到相应的机载大气探测激光雷达模拟回波信号(图 3), 机载大气探测激光雷达模拟回波信号

的探测高度没有选在 10 km, 而是选在 9.39 km, 是因为地基大气探测激光雷达反演气溶胶后向散射系数的标定点选在 9.39 km.

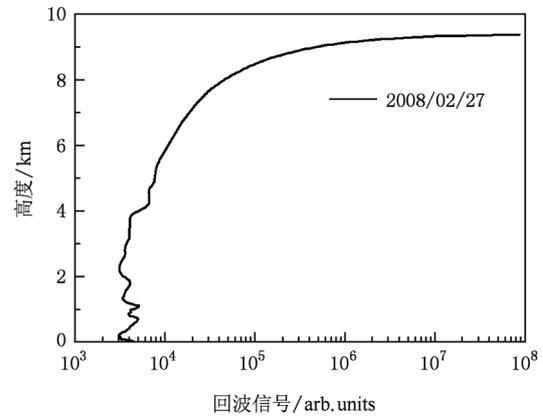


图 3 用地基大气探测激光雷达回波信号模拟的机载激光雷达回波信号

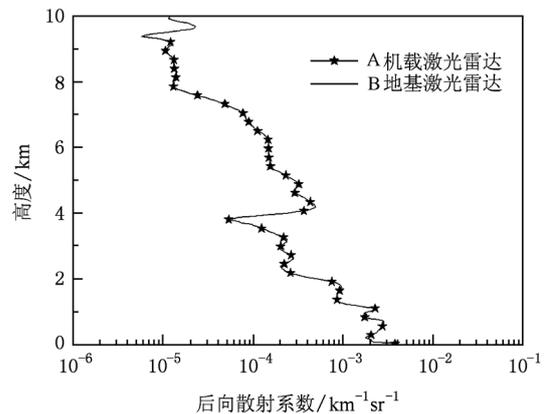


图 4 地基和机载激光雷达信号反演得到的气溶胶后向散射系数对比

利用此模拟回波信号验证 FFIM 应用于机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数反演的可行性, 反演结果要和相应的地基大气探测激光雷达探测数据反演得到的气溶胶后向散射系数对比, 要求两者具有相同的标定点. 机载大气探测激光雷达的标定点选取在激光发射口, 相应的标定值选取激光发射口处气溶胶的后向散射系数值, 飞机的高度选在地基大气探测激光雷达反演气溶胶后向散射系数时标定点的位置, 就是要使地基大气探测激光雷达和机载大气探测激光雷达有相同的后向散射系数反演的标定点; 利用 FFIM 处理机载大气探测激光雷达模拟回波信号时, 其标定值采用地基大气探测激光雷达反演气溶胶后向散射系数廓线时标定

点处的气溶胶后向散射系数值。

图4中的曲线A是利用FFIM对图3中的机载大气探测激光雷达模拟信号进行反演得到的气溶胶后向散射系数廓线,图4中的曲线B是利用地基大气探测激光雷达回波信号反演得到的气溶胶后向散射系数廓线,由于地基大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数的反演结果是比较准确的,从图4中可以看出,机载大气探测激光雷达在10 km左右的高度进行大气探测且当标定值能够准确标定时,FFIM处理机载大气探测激光雷达回波信号得到的气溶胶后向散射系数是可靠的。

3.1.2. 标定值误差对反演结果的影响

分别赋给标定值100%,200%,300%和400%的误差,利用FFIM反演机载大气探测激光雷达模拟信号得到相应的气溶胶后向散射系数廓线,如图5(a)所示,从图5(a)可以看出,当标定值存在100%—400%的误差时,反演得到的气溶胶后向散射系数的误差不是很大,特别是地面附近,反演结果差别较小;定量分析表明(图5(b)):当标定值存在400%误差时,在0—7 km的高度范围内,除去个

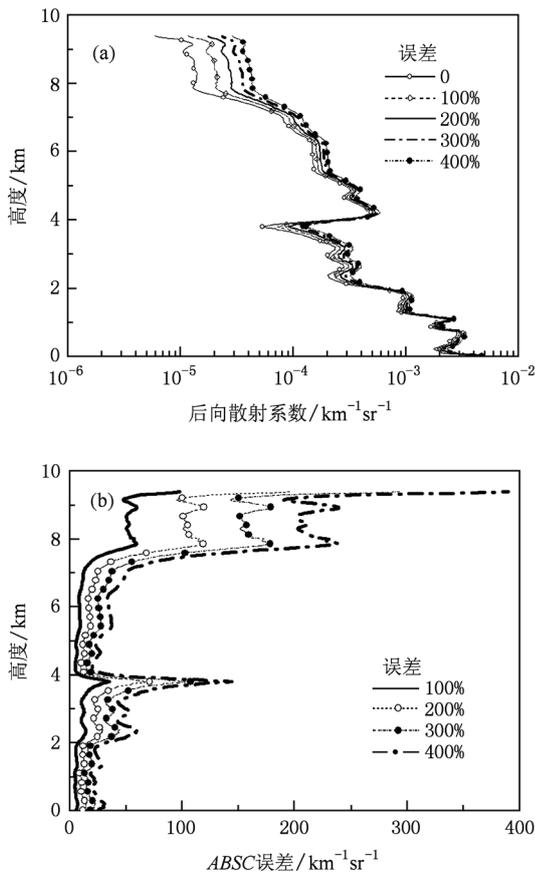


图5 标定值误差对反演结果的影响

别探测点外,利用FFIM反演得到的气溶胶后向散射系数ABSC的相对误差在100%以内,7 km高度以上,反演得到的气溶胶后向散射系数相对误差在50%—400%之间。

从上面的反演结果可以看出,FFIM是能够用于机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数反演的。

3.2. FFIM能够用于机载激光雷达气溶胶后向散射系数反演的原因探讨

3.2.1. 第一个原因:反演方程中 $c - b$ 项大于0

大量的统计分析表明:对机载大气探测激光雷达,当探测高度在4.5 km以上时,如果前向积分的标定点选在飞机高度附近,反演方程中的 $c - b$ 项一般大于0,当标定值存在较大的误差时, $c - b$ 项的值变化很小而且一般不会出现0或负值.图6(a)是利用FFIM对图3中的机载激光雷达模拟信号进行气溶胶后向散射系数反演时,FFIE中的 $c - b$ 项随高度的变化情况,从图6中可以看出,当标定值存在较大的误差时,反演方程中的 $c - b$ 项变化很小且远大于0。

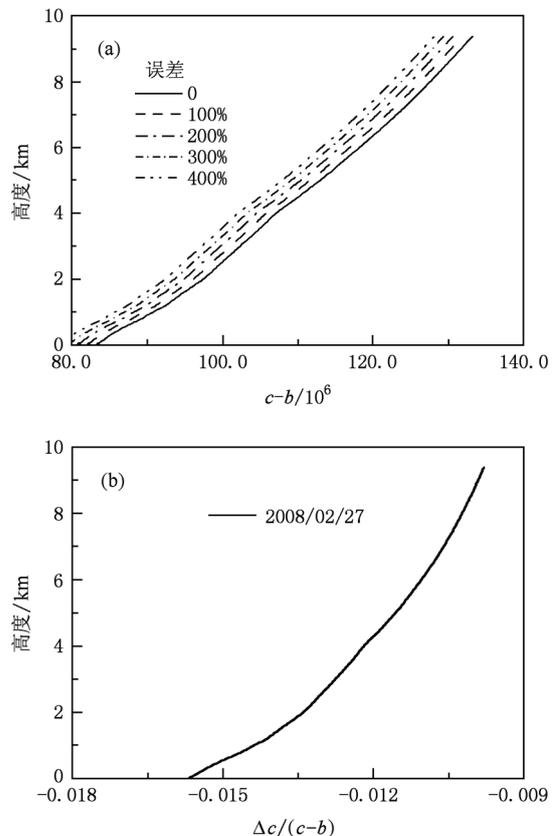


图6 机载激光雷达的 $(c - b)$ 项和 $\Delta c / (c - b)$ 项

3.2.2. 第二个原因:反演起始误差小

从模式大气图 1 可以看出,在 4.5 km 以上,气溶胶的后向散射系数要小于分子的后向散射系数,气溶胶后向散射系数的较大误差,对 c 值的影响不大,即 Δc 的绝对值较小.下面具体分析这个问题.

当气溶胶后向散射系数的标定值存在误差时, c 值会发生变化,假设其值由 c 变为 $c + \Delta c$,则(5)式变为

$$\beta_e = \frac{a}{c + \Delta c - b} = \frac{a}{\Delta c + c - b} \quad (8)$$

将(8)式中分子分母同除 $(c - b)$,则

$$\begin{aligned} \beta_e &= \frac{a/(c - b)}{1 + \Delta c/(c - b)} \\ &= \frac{\beta}{1 + \Delta c/(c - b)}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中, β_e 代表标定值存在误差时的气溶胶后向散射系数, β 代表标定值能够准确标定时的气溶胶后向散射系数.

FFIM 用于机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数反演时,误差较大的另一个原因是因为(9)式中 b 的原因.根据(3)式可知, b 是一个积分量,积分的距离越长, b 值越大.当 b 值增大时,如果 Δc 的值为零,不会对反演结果产生影响.

在实际反演中,标定值存在误差是很正常的现象,当标定值不能准确标定时, Δc 项就不为零,随着积分距离的增大, b 值变大, $c - b$ 值将变小,误差项 $\Delta c/(c - b)$ 绝对值增大(Δc 的绝对值越大,反演得到的气溶胶后向散射系数误差越大:当 Δc 为正值时,反演得到的气溶胶后向散射系数偏小;当 Δc 为负值时,反演得到的气溶胶后向散射系数偏大),这实际上相当于一个“误差放大器”,积分的距离越远,其误差放大倍数越大,误差也就越大.

但是 FFIM 用于机载激光雷达气溶胶后向散射系数反演时,反演所用的标定点一般选在激光发射口附近,由于机载激光雷达的探测高度大都在 4.5 km 以上,所以标定点处的气溶胶后向散射系数的值很小,一般比同高度分子的后向散射系数小得多,这样对 c 值的大小起决定作用的不是气溶胶粒子的后向散射系数,而是分子的后向散射系数,气溶胶后向散射系数存在一定误差时,对 c 值影响不大,也就是 Δc 初始值较小,即使经过“误差放大器”的放大,其值对反演结果的影响也不大.

图 6(b) 是利用 FFIM 对机载激光雷达模拟信号进行反演时误差项 $\Delta c/(c - b)$ 随高度的变化情

况,从图 6 中可以看出,当标定值存在 100% 的误差时,在标定点处误差项的值仅为 -0.0098 ,这一误差随着反演距离的增大而不断地被放大,但由于误差项初始值较小,到达地面时误差项的值仅为 -0.016 ,非常明显,反演结果的误差幅值在气溶胶后向散射系数反演精度允许的范围.

3.2.3. FFIM 反演结果的相对误差与大气结构的关系研究

上面提到的气溶胶后向散射系数的反演误差实际上是指绝对误差,在气溶胶后向散射系数反演中,判断一种方法能不能用于气溶胶后向散射系数反演,主要是看相对误差的大小,FFIM 反演得到的气溶胶后向散射系数可表示为

$$\beta_{ae} = \beta_e - \beta_m, \quad (10)$$

$$\beta_\alpha = \beta - \beta_m, \quad (11)$$

其中 β_{ae} 代表标定值不能准确标定时反演得到的气溶胶后向散射系数, β_e 代表标定值不能准确标定时反演得到的总的大气后向散射系数, β_α 为标定值能准确标定时反演得到的气溶胶后向散射系数, β 为标定值能准确标定时反演得到的总的大气后向散射系数, β_m 为分子的后向散射系数.

利用 FFIM 反演得到的气溶胶后向散射系数的相对误差可表示为

$$\begin{aligned} R_\beta &= \frac{\Delta\beta_\alpha}{\beta_\alpha} = \frac{\beta_{ae} - \beta_\alpha}{\beta_\alpha} = \frac{\beta_e - \beta_m(\beta - \beta_m)}{\beta_\alpha} \\ &= \frac{\beta_e - \beta}{\beta_\alpha}. \end{aligned} \quad (12)$$

为了定量分析标定点的标定值大小和气溶胶的浓度随高度的分布对 FFIM 反演得到的气溶胶后向散射系数的影响,利用 2008-02-27 地基大气探测激光雷达探测得到的气溶胶后向散射系数 $ABSC(z)$ 除以标定点的后向散射系数 $ABSC(z_c)$ (9.39 km 处气溶胶后向散射系数)得到图 7(a) 的廓线,然后利用标定值(9.39 km 处气溶胶后向散射系数)分别除以图 7(a) 中廓线上的值,得到廓线如图 7(b) 所示,我们假定图 7(b) 中的数据是要探测大气的气溶胶后向散射系数随高度的垂直分布(这是一个典型的上密下疏的大气模式).利用图 7(b) 的假设大气(大气模式 A)、2008-02-27 的大气(大气模式 B)、气溶胶后向散射系数是 2008-02-27 气溶胶后向散射系数 2 倍的大气(大气模式 C)和只有标定点的气溶胶后向散射系数是 2008-02-27 同高度气溶胶后向散射系数 2 倍,其他高度的气溶胶后向散射系数都

等同于 2008-02-27 气溶胶后向散射系数的大气(大气模式 D),分别模拟出相应的机载激光雷达探测信号(飞机高度在 9.39 km),计算出当标定值存在 100% 的误差时,利用 FFIM 反演上述 4 个机载激光雷达模拟回波信号得到气溶胶后向散射系数的绝对误差,分别对应图 8(a)中的模式 A, B, C 和 D,从模式 A, B 和 C, D 可以看出,当标定点和标定值相同、标定值均存在 100% 的误差时,利用 FFIM 反演气溶胶后向散射系数大的大气时得到的气溶胶后向散射系数的绝对误差较大;由模式 B, D 可以看出,当气溶胶后向散射系数随高度的分布相同、标定值均存在 100% 的误差时,标定值大的反演得到的气溶胶后向散射系数的绝对误差较大.

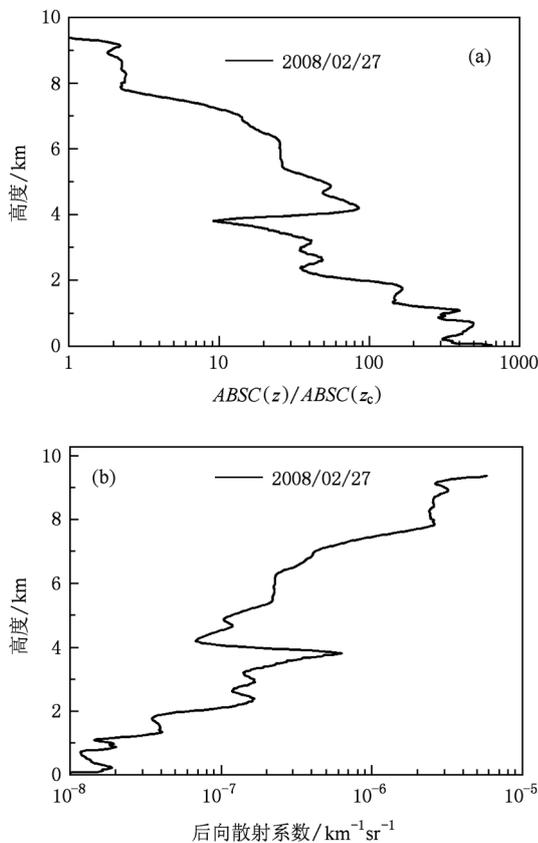


图 7 (a)各高度的气溶胶后向散射系数与标定点气溶胶后向散射系数的比值;(b)标定点的气溶胶后向散射系数与图(a)数据的比值

但是绝对误差的大小只是 FFIM 能否用于机载激光雷达气溶胶后向散射系数反演的一个参考值,FFIM 能否用于机载激光雷达气溶胶后向散射系数的反演取决于反演结果相对误差的大小.赋给标定值 100% 的误差,利用 FFIM 反演大气模式 A, B, C 和 D 时,得到的气溶胶后向散射系数的相

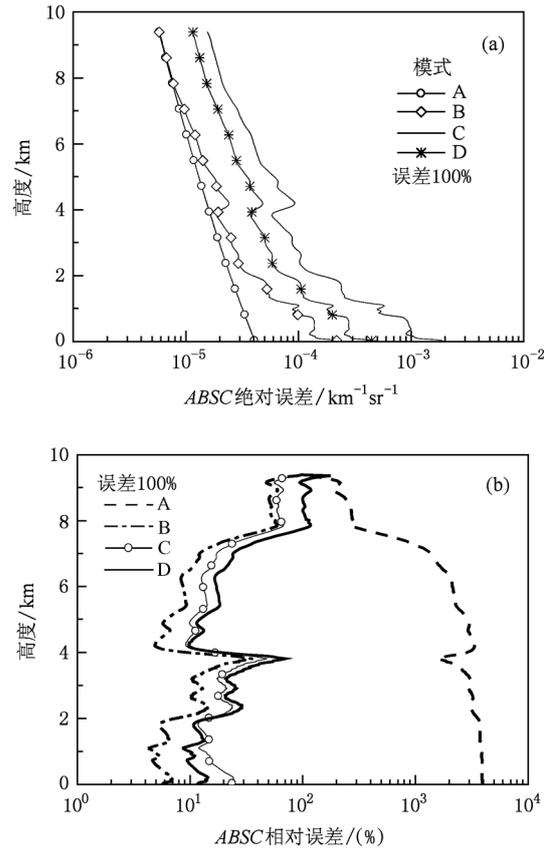


图 8 FFIM 反演得到的各种大气模式的气溶胶后向散射系数的绝对误差(a)和相对误差(b)

对误差如图 8(b)所示,从图中模式 A 和模式 B 的对比可以看出,尽管两者的标定值及标定值误差相同,但由于模式 A 对应的大气随离飞机距离的增加,气溶胶浓度不断减小,模式 B 对应的大气随离飞机距离的增加,气溶胶浓度在增大,这种气溶胶浓度随高度分布上的差异引起气溶胶后向散射系数相对误差的巨大差异,当标定值存在 100% 的误差时,模式 B 的相对误差在 10%—100% 之间,其中在边界层内相对误差在 10% 左右,而模式 A 在地面附近的相对误差接近 4000%,在这种情况下,FFIM 已经不能用来反演大气模式 A 的气溶胶后向散射系数.很明显,FFIM 只所以能用来反演机载激光雷达气溶胶后向散射系数,与离飞机越远,气溶胶浓度越大的大气分布模式有密切的关系.根据(12)式可知,利用 FFIM 反演大气模式 B 的气溶胶后向散射系数时,随着气溶胶浓度的增大,反演得到的气溶胶后向散射系数的相对误差有减小的趋势.

由图 8(a)和(b)的模式 B 和 D 对比可以看出,

FFIM 反演得到的机载激光雷达气溶胶后向散射系数相对误差的大小与标定值的大小有关,标定值较大的,反演得到的气溶胶的后向散射系数相对误差较大,这和利用(9)式分析得到的结果相符合。

4. 对比研究:FFIM 不能用于地基大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数反演的原因分析

4.1. 第一个原因: $c - b$ 项有可能为 0 或负值

利用 FFIM 进行气溶胶后向散射系数的反演, $c - b$ 项的值大于 0 是能够进行反演的前提. 统计分析表明:对于地基大气探测激光雷达,当标定点选在地面附近且用 FFIM 进行气溶胶后向散射系数反演时,(5)式中 $c - b$ 值有时等于或小于 0;对于某些 $c - b$ 值大于 0 的地基大气探测激光雷达回波信号,当标定值存在较大的误差时, $c - b$ 的值在某一反演高度也会出现负值. 图 9(a) 是利用地基双波长激光雷达测得的实际数据(图 2)反演得到的 $c - b$ 值随

高度的变化,从图 9(a) 中可以看出,当标定值误差较小时, $c - b$ 的值为正,但当标定值误差增大为 300% 时,在 5 km 以上 $c - b$ 出现负值。

4.2. 第二个原因:反演起始误差较大

对相当一部分地基大气探测激光雷达探测数据,利用 FFIM 进行反演时, $c - b$ 项不出现负值,但反演误差的起始值较大,这个误差经过“误差放大器”的放大,会给气溶胶的后向散射系数的反演结果带来较大的误差,下面具体分析这个问题。

从模式大气图 1 可以看出,在地面附近,气溶胶的后向散射系数要大于分子的后向散射系数,气溶胶后向散射系数的较小误差,会使 c 值有较大幅度变化,即 Δc 的绝对值较大. 地基大气探测激光雷达用 FFIM 进行气溶胶后向散射系数反演时误差较大的原因是因为在地面附近,气溶胶的后向散射系数较分子的大。

FFIM 用于地基大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数反演时,也存在“误差放大器”,即当标定值不能准确标定时, Δc 的值就不为 0,随着积分距离的增大, b 值变大,标定值的绝对误差会不断地被放大。

图 9(b) 是用 FFIM 对 2008-02-27 的地基大气探测激光雷达模拟信号进行反演时,误差项 $\Delta c / (c - b)$ 随积分距离的变化情况,从图中可以看出,当标定值存在 100% 的误差时,误差项 $\Delta c / (c - b)$ 的初始值为 -0.41 ,而且这一误差随着反演距离的增大不断地被放大,到 15 km 的高度,误差项的值已经达到 -0.68 。

4.3. 根本原因:大气中气溶胶浓度随着高度的增加而减小的大气模式

上面提到的气溶胶后向散射系数的反演误差实际上是指绝对误差,在气溶胶后向散射系数反演中,判断一种方法能不能用于气溶胶后向散射系数的反演,主要是看相对误差的大小. 非常明显,相对误差的大小不仅与反演得到的气溶胶后向散射系数的绝对误差有关,还与气溶胶的后向散射系数数值大小有关. 对地基大气探测激光雷达,随着反演距离的增加,其反演结果的绝对误差在增大;随着高度的增加,气溶胶的后向散射系数在减小,根据(12)式可知,在高度较高处,利用 FFIM 反演得到的

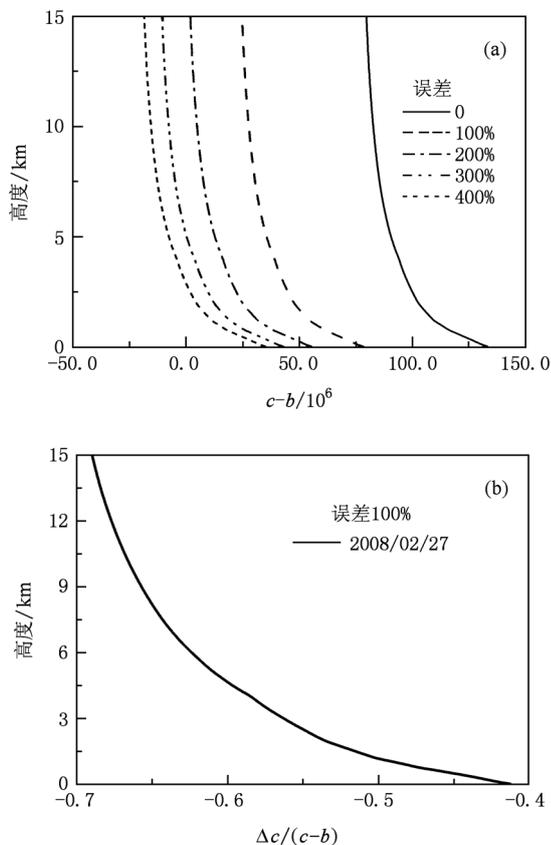


图 9 地基大气探测激光雷达的 $(c - b)$ 项和 $\Delta c/(c - b)$ 项

气溶胶后向散射系数的相对误差有可能很大,也就是说,对地基大气探测激光雷达而言,由于气溶胶浓度随离激光雷达距离的增加而减小,FFIM 用于反演气溶胶后向散射系数廓线时,在气溶胶浓度较小的高度处利用 FFIM 反演得到的气溶胶后向散射系数的相对误差较大.

用 FFIM 进行地基大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数的反演,对某些回波信号在反演方程中出现 $c - b$ 项等于 0 或小于 0 的情况,致使反演不能进行;对在反演方程中 $c - b$ 项大于 0 的数据,由于地面气溶胶的后向散射系数较分子的大,地面气溶胶后向散射系数的较小误差,可以引起 Δc 的较大变化,而这一误差又随积分距离的增大被不断地放大,使较小的标定值误差能够产生较大的反演误差;大气中气溶胶浓度随高度的增加而减小的分布模式,使 FFIM 应用于地基大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数反演时,随着高度的增加,反演结果的相对误差有增大的趋势. 这就是 FFIM 不能用于地基大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数反演的主要原因.

5. 结 论

经过分析研究,FFIM 能够用于机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数的反演,主要有以下几个原因:

1) FFIM 能够用于机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数反演的第一个原因是 FFIE 中的分母两项的差远大于零.

2) FFIM 应用于机载大气探测激光雷达气溶胶后向散射系数反演时,由于标定点选在较高的高度,标定点处气溶胶的后向散射系数远小于分子的后向散射系数,气溶胶后向散射系数的较大误差,对 FFIE 中的标定项影响很小,从而使标定的起始误差小,起始误差经“误差放大器”放大后,最终形成的误差一般在气溶胶后向散射系数的反演误差允许范围之内.

3) 气溶胶浓度随离飞机距离的增加而增大的大气分布模式,有助于减小利用 FFIM 反演得到的气溶胶后向散射系数的相对误差.

- [1] Mao J T, Zhang J H, Wang M H 2002 *Acta Meteorolog. Sin.* **60** 625 (in Chinese) [毛节泰、张军华、王美华 2002 气象学报 **60** 625]
- [2] Wang M, Hu S X, Fang X, Wang S L, Cao K F, Zhao P T, Fan G Q, Wang Y J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5091 (in Chinese) [王敏、胡顺星、方欣、汪少林、曹开法、赵培涛、范广强、王英俭 2009 物理学报 **58** 5091]
- [3] Liu QJ, Yang L, Wang J Y, Zuo H Y, Luo S R, Zheng Y C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7376 (in Chinese) [刘巧君、杨林、王劭予、左浩毅、罗时荣、郑玉臣 2009 物理学报 **58** 7376]
- [4] Liu H T, Ge Z Q, Wang Z, Z, Huang W, Zhou J 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 1837 (in Chinese) [刘厚通、葛占旗、王珍珠、黄威、周军 2008 光学学报 **28** 1837]
- [5] Gadhavi H, Jayaraman A 2006 *Ann. Geophys.* **24** 2461
- [6] Liu H T 2008 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: Hefei Institutes of Physical Science) (in Chinese) [刘厚通 博士学位论文(合肥:中国科学院合肥物质科学研究院)]
- [7] Fernald F G 1984 *Appl. Opt.* **23** 652
- [8] Sasano Y, Kobayashi T 1995 *National Institute for Environmental Studies (Final Reports)* p82

Theoretical research of Fernald forward integration method for aerosol backscatter coefficient inversion of airborne atmosphere detecting lidar *

Liu Hou-Tong¹⁾²⁾ Chen Liang-Fu¹⁾ Su Lin^{1)†}

1) (State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China)

2) (Department of Applied Physics, Mathematical Physics College of Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

(Received 5 August 2010; revised manuscript received 2 September 2010)

Abstract

Preliminary inversion results show that the Fernald forward integration method (FFIM) can be used to calculate aerosol backscatter coefficient from airborne atmosphere detecting lidar. But the corresponding theoretical explanations have not been found in relevant papers. In this paper, We use the simulated data based on the ground-based atmosphere detecting radar in Hefei lidar data on February 27, 2008, to quantitatively analyze the above inversion results obtained by the FFIM. Results show that there are three main reasons that the FFIM can be used to calculate aerosol backscatter coefficient when the altitude of lidar calibration points is about 10km. First, the inversion error cannot be infinite and negative results will not appear because the difference between the denominator items in the Fernald forward integration equation is always greater than zero. Second, inversion error is no more than 0.006 when calibration error is 100%, which is 0.6 percent of the denominator value. Third, Molecule backscatter coefficient is dominant in the calibration item of the Fernald forward integration equation. Big fluctuation range of aerosol backscatter coefficient in the calibration points has little influence on the calibration item value. In general, the atmosphere structure that has a small density in the upper layer but a big density in the lower layer, and a high calibration position are two basic reasons for which the FFIM can be applied to the aerosol backscatter coefficient inversion through using airborne atmosphere detecting lidar data.

Keywords: atmospheric optics, Fernald forward integration method, airborne atmosphere detecting lidar, aerosol backscatter coefficient

PACS: 42.68.Wt, 42.79.Qx, 42.68.Jg

* Project supported by the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 20100470601), the Free Exploration Foundation of State Key Laboratory of Remote Sensing Science, the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41075027), and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB950801).

† Corresponding author. E-mail: sulin@irsa.ac.cn