

文章编号: 0253-2239(2005)03-289-4

米氏散射激光雷达近场距离校正函数曲线 拟合法修正*

贺应红¹ 郑玉臣² 程娟¹ 左浩毅¹ 杨经国^{1**}

(¹ 四川大学物理系, 成都 610064
² 香港城市大学物理及材料科学系, 香港)

摘要: 报道了一种修正米氏散射激光雷达近场回波信号的新方法, 首先对近场区实测回波信号距离校正函数进行二次曲线拟合, 获得拟合曲线与实测曲线的差分信号; 然后对远场距离校正函数作直线拟合, 在大气近似均匀假定下, 获得近场回波信号距离校正函数直线斜率; 最后将近场差分信号叠加在该直线上, 获得修正后的近场回波信号距离校正函数曲线。用此方法对米氏散射激光雷达近场回波信号的实际计算证明, 该方法可获得与实际更为接近的反演结果。

关键词: 大气光学; 近场回波信号修正; 距离校正函数; 曲线拟合

中图分类号: O433 文献标识码: A

The Correction of Short-Range Laser Lidar Returns with Fitting to Lidar Range-Adjusted Power

He Yinghong¹ Andrew Yuk Sun Cheng² Cheng Juan¹ Zuo Haoyi¹ Yang Jingguo¹

(¹ Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064
² Department of Physics and Materials Science, City University of Hong Kong, Hong Kong)

Abstract: A new method for correcting scattering laser lidar data is reported. Firstly, in the insufficient overlapping range between the transmitting laser beam and the field of view of the receiving telescope, the logarithmic range-adjusted power curve $S(r)$ is fitted with conic, and the difference between the conic and the original $S(r)$ in the short range is gotten. Secondly, the slope of curve $S(r)$ in short range is obtained by fitting the curve $S(r)$ in the long range on the assumption of an almost homogenous atmosphere. At last, by adding difference signal to the fitting line of $S(r)$ in the short range, the short-range $S(r)$ is corrected. The correction results are close to the real atmospheric conditions.

Key words: atmospheric optics; correction of short-range laser lidar returns; range-adjusted functionfitting

1 引 言

激光雷达是一种很好的遥感工具, 它具有很高的空间和时间分辨率, 激光束可与微小的大气气溶胶粒子产生有效的相互作用, 利用它可探测诸多的大气参量, 如大气消光及后向散射系数、气溶胶模式、大气能见度等。然而, 由于激光光束在传播中与接收望远镜视场在近距离内存在不完全交叠区, 所探测的近距离回波信号低于真实的大气回波信号, 从而导致在近场范围内回波信号距离校正函数曲线

$S(r) = \ln[r^2 P(r)]$ [$P(r)$ 为回波信号, r 为探测距离] 随传播距离可能呈上升趋势。而由于大气的吸收作用, 真实回波信号距离校正函数曲线应该呈近似线性下降, 因此, 传统的大气米氏散射雷达反演算法中往往将探测的近场回波信号抛弃, 仅仅对完全重叠区的回波信号进行反演^[1], 造成了近距离的大气信息丢失。一些作者探索了近距离回波信号修正方法, 如 Sasano 等^[2] 提出使用实验所获得的实测回波信号, 通过假设大气后向散射系数为一常数, 得到大气

* 国家自然科学基金(60078020)和国防科技重点实验室基金(00JS75.3.1.JW1906)资助课题。

作者简介: 贺应红(1977~), 女, 四川大学物理科学与技术学院硕士研究生, 主要从事光散射方面的研究工作。

** 通信联系人。E-mail: yangjingguo@hotmail.com。

收稿日期: 2004-03-24; 收到修改稿日期: 2004-07-13

回波功率与距离平方成反比的近似结果,该方法无法获得近距离大气回波信号的详细信息。一些作者应用光学理论计算来修正近距离大气回波信号^[3,4],但由于各种参量状态难以确定,因此不仅计算方法复杂,而且很难准确修正近距离大气回波信号。

本文报道一种新的修正近场大气回波信号的方法。由于实际大气近似均匀,因此,米氏散射激光雷达回波信号距离校正函数 $S(r)$ 的负斜率直接比例于大气消光系数,从而可以认为在未完全重叠区(即近场区) $S(r)$ 与远场区的 $S(r)$ 函数有近似相等的斜率。由此出发,应用曲线拟合获得经过近场修正的回波信号距离校正函数曲线,实现对近场回波信号修正,进而求得消光系数。

2 近场回波信号修正方法

2.1 近场区激光束与望远镜接收视场交叠面积 $A(r)$ 的计算

激光雷达装置如图 1 所示。

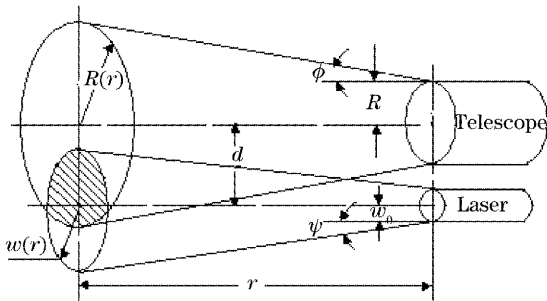


图 1 激光雷达装置示意图

Fig. 1 The lidar arrangement

望远镜视场角为 ϕ , 入瞳孔径为 $2R$, 激光光束光斑直径为 $2w_0$, 光束发散角为 ψ , 发射光束与望远镜离轴距离为 d 。当光束传播距离为 r 时, 光斑半径 $w(r) = w_0 + r \tan \psi$, 望远镜接收视场半径 $R(r) = R + r \tan \phi$, 假设交叠的两段圆弧分别对应的圆心角为 2α 和 2β , 激光束与望远镜接收视场交叠面积为 $A(r)$, 从图可以知道, 当 $d \geq R(r) + w(r)$ 时, $A(r) = 0$; 当 $d \leq |R(r) - w(r)|$ 时, $A(r) = \pi w^2(r)$, 当 $R(r) - w(r) \leq d \leq R(r) + w(r)$ 时, 由几何知识可以解得 $A(r)$ 为:

$$A(r) = r^2 \frac{\alpha \tan^2 \phi + \beta \tan^2 \psi}{2} + r \left(R \alpha \tan \phi + w_0 \beta \tan \psi - \frac{1}{2} d \tan \phi \sin \alpha \right) + \frac{1}{2} (R^2 \alpha + w_0^2 \beta - R d \sin \alpha), \quad (1)$$

从(1)式可见, 交叠面积 $A(r)$ 为传播距离 r 的二次函数, 简写为

$$A(r) = ar^2 + br + c, \quad (2)$$

实验测得的回波信号 $P(r)$ 与理论预期 $P'(r)$ 的关系可表示为

$$P(r) = \frac{P'(r)}{\pi w^2(r)} A(r), \quad (3)$$

从而有

$$S(r) = \ln[r^2 P(r)] = \ln \left[r^2 \frac{P'(r)}{\pi w^2(r)} A(r) \right], \quad (4)$$

由(3)式可知, 当 $A(r) = 0$ 时, 即激光束与接收视场没有交叠时, 回波信号强度为 0, 当 $A(r) = \pi w^2(r)$, 即激光束与接收视场完全交叠后, 实测回波信号强度 $P(r)$ 与大气预期回波信号强度相等, 而在近场范围激光束与接收视场不完全交叠区, 实测回波信号强度 $P(r)$ 小于大气预期回波信号 $P'(r)$, 因此需对实测信号进行距离校正, 从(4)式可知, 校正函数 $S(r) \propto A(r)$, 从而在近场范围内未修正的实测回波信号距离校正函数可假定为光束传播距离的二次函数。

2.2 近场距离校正函数曲线 $S(r)$ 的修正

图 2 中曲线 1 为实测激光雷达回波信号的距离校正函数曲线 $S(r)$ 。由曲线 1 可知, 当传播距离大于 r_m 时, $S(r)$ 随 r 呈近似线性下降趋势, 表现出大气消光属性, 而对于 $r < r_m$ 区域, $S(r)$ 随 r 呈上升趋势, 其负导数大于 0, 与大气吸收属性相违背, 因此必须对此加以修正。图 2 中坐标点 $[r_m, S(r_m)]$ 可理解为光束传播距离为 r_m 时, 激光束与接收视场完全交叠, 此时的回波信号的距离校正函数值为 $S(r_m)$ 。

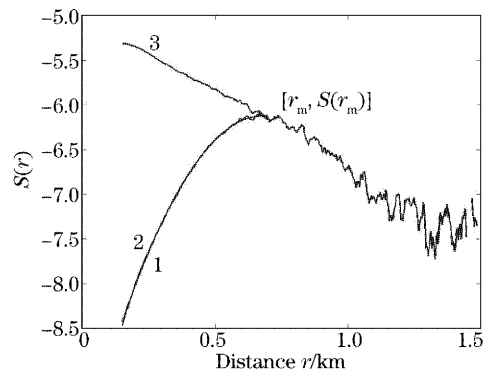


图 2 回波信号距离校正函数曲线

Fig. 2 The range-adjusted curves $S(r)$ of return signal

从前面的讨论可知, 近场范围内实测回波信号的距离校正函数曲线是光束传播距离的二次函数, 因此, 可对近场范围 $r < r_m$ 的实测回波信号距离校正函数(如图 2 曲线 1)进行二次曲线拟合, 得到曲线 2, 设为 $S_2(r)$ 。作曲线 1 与曲线 2 的差分 $\Delta S(r)$, 即

$$\Delta S(r) = S(r) - S_2(r). \quad (5)$$

使用最小二乘法对 $r \geq r_m$ 的远场 $S(r)$ 进行直线拟合, 即选择合适的 $S(r)$ 斜率 k 和截距 c , 使下式

$$\| S(r) - kr - c \|^2 = \sum_{r_i \geq r_m} [S(r_i) - kr_i - c]^2, \quad (6)$$

最小, 获得远场 $S(r)$ 斜率 k 及截距 c 。

在大气近似均匀假定下, 近场与远场区的回波信号距离校正函数应有近似相等的斜率 k , 再考虑到近场与远场交叠点 (r_m) 处, $S'(r_m) = S(r_m)$, 最后, 叠加以近场差分信号 $\Delta S(r)$, 获得最终修正的近场信号距离校正函数 $S'(r)$:

$$S'(r) = k(r - r_m) + S(r_m) + \Delta S(r), \quad (7)$$

$$r \leq r_m$$

所获得的 $S'(r)$ 如图 2 中曲线 3 所示, 从而实现对近场回波信号距离校正函数的修正。

3 实际大气近场信号的修正

使用本文所述的近场修正方法对实际测量的近

场大气米氏散射激光雷达信号进行了实际修正。为了验证方法的可行性, 使用 Klett^[1] 的散射激光雷达数据的分析反演算法及贺应红等^[5] 的消光系数边界值估算方法对修正后的大气信号进行了消光系数的反演。为了对比, 还使用了 Sasano 等的近场修正方法所得到回波信号及未修正的回波信号利用消光系数反演方法进行了消光系数的反演。

图 3 的原始数据由四川大学物理系分别于 2003 年 12 月 23 日、24 日及 25 日在四川成都地区采集所得, 其中, 25 日天气晴见多云, 大气的能见度高, 使用本文所述方法进行近场信号经修正后所得大气消光系数范围为 0.25~0.4, 24 日为大雾天气, 近场信号经修正后大气消光系数范围为 1.0~1.8, 23 日为阴天, 近场信号经修正后大气消光系数范围为 0.8~1.2。图 3 中的曲线 1、2、3 分别对应使用未校正的实测回波信号、利用 Sasano 等的近场修正方法所得到回波信号及本文所述方法修正后的回波信号反演后的大气消光系数。

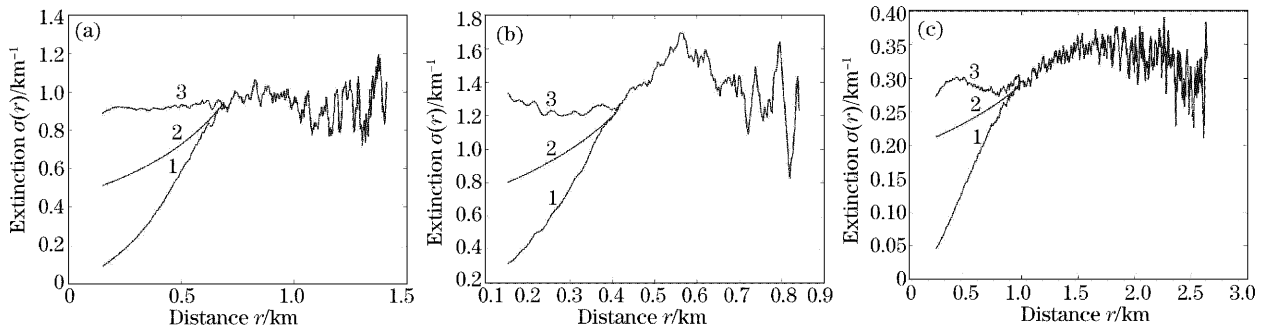


图 3 使用不同近距离回波修正方法在不同天气下回波信号消光系数反演。(a)多云,(b)雾,(c)晴天

Fig. 3 Inversion of extinction efficient of the backscatter signal with different method of correction of short-range returns in different weather (a) cloudy day, (b) fog day, (c) sunny day

实际大气通常呈不均匀状态, 但当激光雷达的发射光束在没有与云层相遇的时候, 大气消光系数不会有很大的变化, 由图 3 可知, 直接将未校正的雷达回波信号进行大气消光系数的反演, 所得到的近场大气消光系数很小, 与实际状态严重偏离, 使用 Sasano 等提出的近场修正方法所得到回波信号反演的近场大气消光系数虽然比未校正状态有所提高, 但仍远小于远场消光系数, 没有反映出真实的大气近场信息, 使用本文所述的近场信号修正方法所获得的大气回波信号反演得到的近场大气消光系数与远场消光系数大致相当, 并且有具体的信息细节, 较真实的反映了大气近场信息。

使用不同的近场信号修正方法, 对 2000 年 3 月

7 日当地时间下午 3 点在香港城市大学采集的整个扫描范围的近场信号进行修正, 再利用 Klett 的散射激光雷达数据的分析反演算法及贺应红等的消光系数边界值估算方法对修正后的信号进行了消光系数反演, 其结果如图 4 所示, 其中图 4(a)~图 4(c) 近场信号分别对应未校正、Sasano 等的近场修正方法及本文方法修正后的回波信号。比较三个图, 可以看出, 图 4(a)中, 由于近场信号未校正, 近场的消光系数数值范围为 0.01~0.1, 而远场消光系数数值范围为 0.1~0.3, 因此远小于远场的消光系数, 这与实际大气中消光系数趋于平缓变化的物理概念不相符。图 4(b)的近场信号由 Sasano 等的近场修正方法所得, 从图可看出, 近场的消光系数数值范围为

0.05~0.15,消光系数值虽有所提高,但丢失了近场的详细信息细节。使用本文所述方法修正后的近场回波信号,其反演出的消光系数值范围为0.1~

0.2,与远场消光系数趋于平缓变化,并且携带明显的信息细节,更加接近实际大气状态。

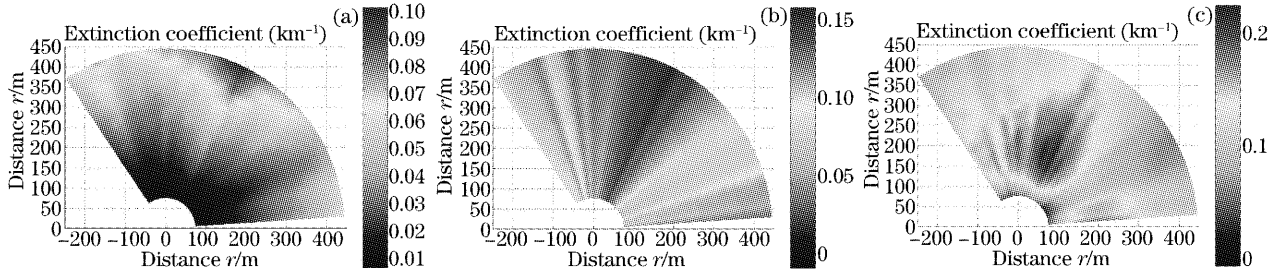


图4 使用不同近距离修正方法的回波信号消光系数反演。(a)未修正信号,(b)Sasano方法,(c)本文方法

Fig. 4 Inversion of extinction efficient of the backscatter signal with different short-range returns corrected (a) by no correction signal, (b) by Sasano method, (c) by method of this article

4 结 论

本文报道的修正近场大气回波信号的方法,假设大气近似均匀,则全程范围的回波信号距离校正函数曲线斜率近似为一常数,通过对远场完全交叠区的距离校正函数曲线的拟合,获得近场的回波信号距离校正函数曲线,对近场区的回波信号距离校正函数进行二次曲线拟合,获得修正后的近场回波信号距离校正函数曲线,从而实现对近场回波信号修正。

通过比较未进行近场修正、Sasano等的近场修正方法及本文的近场修正方法获得的大气消光系数的反演结果,可以看出本文修正的结果能清晰反映出近场消光系数信息,验证了本文修正方法是可行的。该方法物理思想清晰,不需要对众多装置参量的确定,

是散射激光大气雷达反演中较好的近场修正方法。

参 考 文 献

- 1 James D. Klett. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(2): 211~220
 - 2 Y. Sasano, H. Shimizu, N. Takevchi *et al.*. Geometrical form factor in the laser radar equation: an experimental determination [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(23): 3908~3910
 - 3 T. Halldorsson, J. Longenholc. Geometrical form factors for the lidar function[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(2): 240~244
 - 4 J. Harms, W. Lahmann, C. Weitkamp. Geometrical compression of lidar return signals[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(7): 1131~1135
 - 5 He Yinghong, Andrew Yuk SUn Cheng, Zuo Haoyi *et al.*. Estimation of extinction efficient boundary value with least-square fitting for lidar return signal[J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2004, **21**(6): 879~883 (in Chinese)
- 贺应红,郑玉臣,程 娟等. 最小二乘法拟合大气激光雷达回波信号估算消光系数边界值[J]. 量子电子学报, 2004, **21**(6): 879~883