

文章编号: 0253-2239(2010)s100512

转动拉曼米氏散射激光雷达反演气溶胶消光系数

王玉诏 张寅超 陈思颖 邱宗甲 孔卫国 刘 鹏 陈 和
(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要 利用激光雷达米氏(Mie)散射回波信号与转动拉曼(Raman)回波信号的差值,结合已知的大气分子消光系数,构造纯气溶胶回波用以反演气溶胶消光系数。假设气溶胶消光后向散射比在相邻高度上相近,即微分为零,根据纯气溶胶回波信号公式推导出反演大气气溶胶消光系数的积分公式。该方法利用转动 Raman 散射信号与气溶胶后向散射无关的特性去除 Mie 散射信号中大气分子后向散射部分,降低了大气分子数密度波动对反演结果的影响,用积分反演提高了结果的稳定性。最后用自行研制的转动拉曼米氏(Raman-Mie)散射激光雷达(RRML)回波信号对该方法进行验证,结果表明该方法能有效地反演气溶胶消光系数廓线。

关键词 大气光学;激光雷达;消光系数;纯气溶胶回波;转动拉曼米氏;气溶胶

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100512

New Method for Aerosol Extinction Coefficient Inversion by Using a Rotational Raman-Mie Scattering Lidar

Wang Yuzhao Zhang Yinchao Chen Siying Qiu Zongjia
Kong Weiguo Liu Peng Chen He

(Key Laboratory of Photoelectric Imaging and Information Engineering, Ministry of Education, Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Assuming atmospheric molecules extinction coefficient is known, a new method for retrieving aerosol extinction coefficient with pure aerosol echoes is proposed. The pure aerosol echoes are reconstructed with rotational Raman echoes and Mie echoes detected with a rotational Raman-Mie scattering lidar (RRML). Assuming the extinction backscattering ratio is an approximate constant, an integral formula for aerosol extinction coefficient inversion is derived. In the method, the Rayleigh backscattering signal included in the Mie echo is removed to reduce the impact of fluctuation of atmospheric molecules. Finally, the new method is applied to the RRML echo detection by the RRML developed by ourselves. The results show that stable aerosol extinction coefficient profile could be retrieved effectively by using the new method.

Key words atmosphere optics; lidar; extinction; pure aerosol echo; rotational Raman-Mie; aerosol

OCIS codes 010.3640; 280.3640; 280.1100; 010.1100

1 引 言

大气气溶胶是指大气中悬浮的直径为 $0.001 \sim 100 \mu\text{m}$ 的固体或液体颗粒物组成的体系。其来源包括火山、沙尘暴、森林和草原等自然环境以及工业、交通和建筑农业等人类活动。大气气溶胶粒子

通过吸收和散射太阳辐射以及地球的长波辐射而影响地球大气系统的辐射收支,从而对区域乃至全球气候有着重要的影响,被认为是全球气候预测的研究中最不确定的因子之一^[1,2]。因此,进行对流层气溶胶光学特性的测量一直是气候、环境和大气

收稿日期: 2010-08-21; 收到修改稿日期: 2010-10-27

基金项目: 国家 973 计划(2009CB72400402)和国家自然科学基金(40905016)资助课题。

作者简介: 王玉诏(1984—),男,博士研究生,主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: zz0525wyz@163.com

导师简介: 张寅超(1961—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事大气探测、成像激光雷达及光谱分析等方面的研究。

E-mail: ychang@bit.edu.cn

科学等领域研究中十分关心的问题,已为各国所重视。

激光雷达是探测气溶胶光学特性时空分布的有效手段^[3~6]。伴随着激光器的出现,激光雷达凭借其相对于常规雷达的高精度、高时空分辨率,至今已经发展了半个世纪。数十年来,激光技术、信号探测和数据采集及其控制技术的发展使激光雷达在对流层气溶胶的探测高度、垂直跨度、空间分辨率、时间上的连续监测和测量精度等方面具有全面的优势,是其它探测手段很难比拟的。

由于全转动拉曼(Raman)谱与温度无关^[7],本文从转动 Raman 回波信号公式和弹性散射回波信

号公式出发,提出一种用于求解气溶胶消光系数廓线的新方法,并经自行研制的转动拉曼米氏(Raman-Mie)散射激光雷达(RRML)验证,给出了反演的若干结果。

2 用纯转动 Raman 信号和 Mie 散射信号构造气溶胶散射信号

在 200~300 K 温度范围内的对流层大气分子全转动 Raman 谱之和与温度无关^[7],激光雷达全转动 Raman 回波信号可表示为

$$P_r(z) = \frac{C_r}{z^2} N(z) \sigma_r \exp \left\{ - \int_0^z [\alpha_a(\lambda_r, z') + \alpha_m(\lambda_r, z') + \alpha_a(\lambda_0, z') + \alpha_m(\lambda_0, z')] dz' \right\}, \quad (1)$$

式中 $P_r(z)$ 为全转动 Raman 回波信号, C_r 为转动 Raman 通道系统常数, z 为垂直高度, $N(z)$ 为大气分子数密度廓线, σ_r 为大气分子转动 Raman 微分后向散射截面, α_a, α_m 分别为大气气溶胶及大气分子消光系数, λ_0, λ_r 分别为激光发射波长和转动 Raman 波长。由于转动 Raman 频移通常在几十个波数范围内,因此 $\lambda_r \approx \lambda_0$ 。大气分子 Rayleigh 后向散射系数 $\beta_m = N(z) \sigma_m$, 其中 σ_m 为大气分子 Rayleigh 微分后向散射截面,代入(1)式并对 P_r 进行距离修正得:

$$X_r = \frac{C_r \sigma_r}{\sigma_m} \beta_m \exp \left\{ - 2 \int_0^z [\alpha_a(\lambda_0, z') + \alpha_m(\lambda_0, z')] dz' \right\}. \quad (2)$$

距离修正后的激光雷达弹性回波信号为

$$X_e = C_e (\beta_m + \beta_a) \times \exp \left\{ - 2 \int_0^z [\alpha_a(\lambda_0, z') + \alpha_m(\lambda_0, z')] dz' \right\}, \quad (3)$$

式中 X_e 为距离修正后的弹性散射回波信号, C_e 为系统常数, β_a 为气溶胶后向散射系数。定义系统常数比

$$C_{re} = \frac{C_r \sigma_r}{C_e \sigma_m}, \quad (4)$$

则有

$$X_a = C_{re} X_e - X_r = \frac{C_r \sigma_r}{\sigma_m} \beta_a \times \exp \left\{ - 2 \int_0^z [\alpha_a(\lambda, z') + \alpha_m(\lambda_0, z')] dz' \right\}. \quad (5)$$

若已知大气分子消光系数,将其代入上式则有:

$$X_{am} = \frac{C_r \sigma_r}{\sigma_m} \beta_a \exp \left\{ - 2 \int_0^z [\alpha_a(\lambda, z')] dz' \right\}. \quad (6)$$

此信号即为构造出的纯气溶胶回波信号。

3 求解气溶胶消光系数廓线

设气溶胶后向散射系数与消光系数之间的关系为 $\beta_a = S(z) \alpha_a$ 。对(6)式求导,则有:

$$\frac{d \ln X_{am}}{dz} = \frac{d \ln S}{dz} + \frac{d \alpha_a}{\alpha_a dz} - 2 \alpha_a. \quad (7)$$

根据 Fernald 假设的非严格条件,可以认为相邻高度上气溶胶的粒径分布和散射组分不变^[8,9],气溶胶散射变化只与其粒子密度变化有关,此时 $d \ln S / dz \approx 0$, (7)式可近似为

$$\frac{d \ln X_{am}}{dz} \approx \frac{d \alpha_a}{\alpha_a dz} - 2 \alpha_a. \quad (8)$$

已知标定点 z_0 处气溶胶消光系数为 α_{a0} , 纯气溶胶回波信号为 X_{am0} , 对(8)式求解得垂直高度上气溶消光系数廓线

$$\alpha_a = \frac{X_{am} / X_{am0}}{1 / \alpha_{a0} - 2 \int_{z_0}^z X_{am} / X_{am0} dz}. \quad (9)$$

当 $z_0 < z$ 时为前向积分,当 $z_0 > z$ 时为后向积分。

4 实测结果及讨论分析

用于探测对流层大气温度的纯转动 Raman 激光雷达的双通道回波信号,按照一定比例进行线性组合可以组合出与温度无关的伪转动 Raman 信

号^[10]。伪转动 Raman 信号与温度的相关度和全转动 Raman 谱相近,参考文献[10]中给出了用伪转动 Raman 信号反演后向散射比的误差。当组合比例相对误差达到 50%时反演误差小于 9%。用自行研制的 RRML 测温通道构造伪转动 Raman 信号结合弹性散射通道进行反演,该激光雷达的发射波长为 532 nm。构造纯气溶胶回波信号,除了需要纯转动 Raman 回波信号及弹性散射回波信号外,还要确定(4)式中的常数 C_{re} 以及大气分子消光系数。其中大气分子消光系数值取北京南郊探空数据,由于地处北京市区内只能做垂直高度的探测,本文提出一种用转动 Raman-Mie 散射信号标定常数 C_{re} 的方法。由(2)式与(3)式相除可得比值廓线:

$$\frac{X_r}{X_e} = C_{re} \frac{\beta_m}{\beta_m + \beta_n} \quad (10)$$

由(10)式可知,在气溶胶后向散射系数为零的高度上 C_{re} 等于该处转动 Raman 信号与弹性散射信号的比值,且此时比值曲线的最大值处即为气溶胶近似为零的高度。图 1 所示即为求常数 C_{re} 的过程。由图中信号比值可知在 9~10 km 的范围内为气溶胶最小值范围。根据经验取此处的气溶胶后向散射比为 1.05^[11],该段比值的平均值乘以 1.05 即为 C_{re} 。2009 年 11 月 2 日 23:00,用 RRML 测得 $C_{re} = 252$ 。

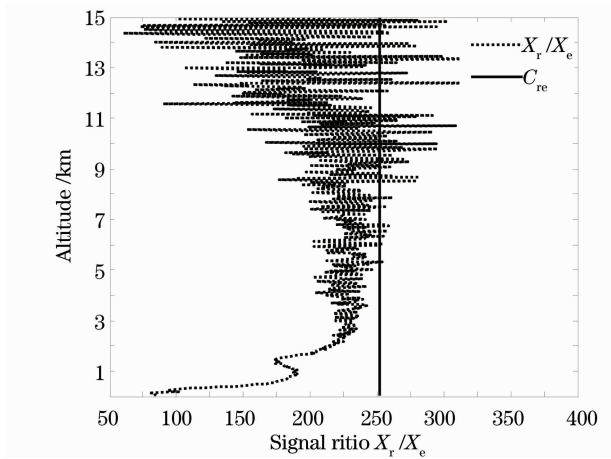


图 1 根据 X_r/X_e 曲线标定常数 C_{re}

Fig. 1 Calibrating constant C_{re} according to X_r/X_e curve

确定了常数 C_{re} 及大气分子消光系数即可构造纯气溶胶回波信号,如图 2(a)所示。其中 L1 是纯溶胶信号,L2 是 Raman 转动信号,L3 是 Mie 散射信号。然后根据(9)式计算气溶胶消光系数廓线,其中的标定点可以参考 Fernald 方法的标定点取法^[9,11],取气溶胶含量最小处气溶胶与大气分子后向散射系数比值为 0.05。图 2(a)是构造的纯气溶

胶信号与转动 Raman 信号及 Mie 散射信号的对比。图 2(b)中是用纯气溶胶方法反演与 Fernald 方法反演气溶胶消光系数的对比,标定高度为 9.5 km。其中 L1 是用新方法得到的消光系数,L2 是用 Fernald 方法得到的结果,L3 是分子消光系数。反演结果表明,新方法计算的消光系数在整个高度上较 Fernald 方法稳定,在前向积分时 Fernald 方法计算值偏大,在 4.5 km 处 Fernald 方法的计算值偏小。用不同信号进行处理的结果表明,Fernald 前向积分具有很大的发散性,有时候甚至为负值,而新方法则能得到比较稳定的分布廓线。用廓线形状与实际天气情况以及大气模型对照可以发现新方法与实际相符。新方法之所以较 Fernald 方法稳定,是因为构造纯气溶胶信号的过程中,去掉了大气分子的后向散射信号,因此减少了大气分子密度波动对气溶胶散射信号的影响。调整标定点消光系数值检验反演廓线的稳性,计算表明 Fernald 后向积分的收敛速度大于新方法。通过以上分析,可以利用 Fernald 方法后向积分稳定的特性获得低层气溶胶消光系数作为标定值,再利用纯气溶胶回波反演方法整体稳定的特性计算总廓线。

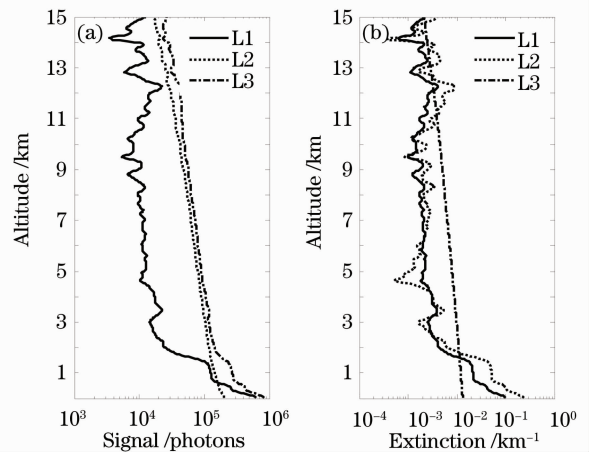


图 2 信号与消光结果

Fig. 2 Signals and Extinction Results

5 结 论

利用激光雷达 Mie 散射回波信号与转动 Raman 回波信号的差值,结合已知的大气分子消光系数,提出利用构造的纯气溶胶回波反演气溶胶消光系数。该方法利用转动 Raman 散射信号去除 Mie 散射信号中大气分子后向散射部分降低了大气分子数密度波动对反演结果的影响,用积分反演提高了结果的稳定性。用自行研制的 RRML 回波信

号对该方法进行验证,结果表明该方法能有效地反演气溶胶消光系数廓线并且其前向积分比 Fernald 方法稳定。

参 考 文 献

- 1 Chen Min, Sun Dongsong, Gu Jiang *et al.*. Two-dimensional distribution of aerosol measured by lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(3): 369~372
陈 敏, 孙东松, 顾 江 等. 激光雷达探测的大气气溶胶空间二维分布[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(3): 369~372
- 2 Summary for policymakers of the synthesis report of the IPCC fourth assessment report [R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. 3~5
- 3 James D . Klett. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(2): 211~220
- 4 Wu Yonghua, Hu Huanling, Zhou Jun *et al.*. Measurements of stratosphere aerosol with L625 lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 1012~1015
吴永华, 胡欢陵, 周 军 等. L625 激光雷达探测平流层气溶胶[J]. *光学学报*, 2001, **21**(8): 1012~1015
- 5 Dong Yunsheng, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Lidar study of the aerosol characteristic in Beijing during traffic controlled[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 292~296
董云升, 刘文清, 刘建国 等. 北京城区限车期间气溶胶特征激光雷达观测研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 292~296
- 6 A. Miffre, M. Abou Chacra, S. Geffroy *et al.*. Aerosol load study in urban area by Lidar and numerical model[J]. *Atmos. Environ.*, 2010, **44**(9): 1152~1161
- 7 D. N. Whiteman. Examination of the traditional Raman lidar technique. 1. evaluating the temperature-dependent lidar equations[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(15): 2571~2592
- 8 T. Takamura, Y. Sasano. Ratio of aerosol backscatter to extinction coefficients as determined from angular scattering measurements for use in atmospheric Lidar applications [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1987, **19**(5): 293~302
- 9 F. G. Fernald. Analysis of atmospheric lidar observations: some comment[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652~655
- 10 Y. Wang, Y. Zhang, S. Chen *et al.*. A new method for obtaining aerosol backscattering ratio with partial pure rotational raman spectrum[C]. *SPIE*, 2009, **7511**: 751111
- 11 Y. Sasano, V. B. Edward. Light scattering characteristic of various aerosol types derived from multiple wavelength lidar observations [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(9): 1670~1679