

## 提高拉曼探测气溶胶消光系数精度的玻-温模式

闫顺生

(唐山学院 基础教学部, 河北 唐山 063000)

**摘要:** 拉曼雷达反演气溶胶消光系数时通常采用“标准模式大气”, 但由于“标准模式大气”与探测地大气密度不符会对探测结果造成一定影响, 为减小这种影响提高拉曼雷达探测气溶胶消光系数的精度, 采用玻耳兹曼能量分布规律和对流层大气温度线性递减的特征确定大气密度廓线以取代“标准模式大气”, 进行了理论推导和实验验证, 结果表明: 新模式是可行的而且与“标准模式大气”相比更加吻合探测地实际大气, 因而更能减小误差, 建议激光雷达数据处理采用这种新模式。

**关键词:** 拉曼雷达; 大气分子密度; 消光系数; 标准模式大气

中图分类号: TN958.96 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)09-3015-05

## Boltzmann-temperature model for enhancing precision of Raman detection aerosol extinction coefficient

Yan Shunsheng

(Basic Teaching Department, Tangshan College, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** "Standard model atmosphere" is usually adopted in Raman lidar aerosol extinction coefficient inversion, but sometimes "standard model atmosphere" does not match the actual atmospheric density so cause a greater impact on the detection results. In order to reduce the influence to enhance Raman lidar aerosol extinction coefficient inversion precision, a new model which atmospheric density profile was determined by the Boltzmann energy distribution and tropospheric temperature linear decline law was proposed to replace "standard model atmosphere", Theoretical derivation and experiment verify the feasibility of the method, and the result shows that the new model is more consistent with actual atmosphere, so it can reduce the error, it is proposed Raman lidar data processing may use this new model.

**Key words:** Raman lidar; atmospheric molecular density; extinction coefficient; standard model atmosphere

收稿日期: 2014-01-11; 修订日期: 2014-02-10

基金项目: 唐山市科技局指导性项目(12130203b)

作者简介: 闫顺生(1977-), 男, 硕士, 主要从事激光雷达探测和物理教学的研究。Email: aiofmyss@163.com

## 0 引言

激光雷达具有很好的时空分辨率,是大气研究与环境监测的有力工具<sup>[1-2]</sup>。拉曼激光雷达是近些年发展起来的一种新颖的探测大气气溶胶的激光雷达方法<sup>[3-4]</sup>,在拉曼激光雷达探测时,非弹性的氮气振动拉曼散射回波信号只受到气溶胶消光系数的影响,而与气溶胶的后向散射系数无关,因此从拉曼回波信号中就可以单独确定气溶胶的消光系数,相对 Mie 散射激光雷达不需预先假定<sup>[5]</sup>气溶胶消光系数和后向散射系数的关系,从原理上具有更加精确的优点,因此在气溶胶监测领域有着更广阔的应用前景<sup>[6]</sup>,是目前公认的与高光谱分辨率激光雷达(HSRL)并列的两种可不需假定、直接探测气溶胶消光参数的技术之一<sup>[7]</sup>。大气分子数密度是拉曼雷达反演过程中需要引入的参数,其值可从标准模式大气或者探空气球的探测中求得。想要获得精确的消光系数,最好是有当地即时的探空数据,但是由于探空费用昂贵实现起来比较困难,所以通常拉曼雷达数据反演中用标准模式大气替代。由于雷达探测地的大气密度和标准模式大气往往存在一定差别甚至有时很大,这将会降低拉曼激光雷达探测结果的精确度,导致拉曼雷达的优越性难以发挥。为减小反演中大气密度对于精度的影响,基于玻耳兹曼能量分布规律和对流层大气温度线性递减的特点,对于拉曼雷达方程大气分子密度项进行了转换,对这种转换进行了理论推导和实验验证。

## 1 拉曼雷达方程及大气密度项的转换

### 1.1 拉曼雷达方程

Raman 散射回波与大气气溶胶的后向散射无关,而主要受气溶胶消光系数的影响,因此可以从激光雷达接收的氮气 Raman 散射回波信号中直接求得大气气溶胶的消光系数  $\alpha_p(\lambda_0, z)$ ,其表达式为<sup>[7]</sup>:

$$\alpha_p(\lambda_0, z) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda_N}{\lambda_0}\right)^{-\nu}} \left\{ \frac{d}{dz} \left[ \ln \frac{f(z)N_{N_2}(z)}{P(\lambda_N, z)Z^2} \right] - a_m(\lambda_0, z) \left[ 1 + \left(\frac{\lambda_N}{\lambda_0}\right)^{-\sigma} \right] \right\} \quad (1)$$

式中: $\alpha_p(\lambda_0, z)$ 为大气气溶胶消光系数; $a_m(\lambda_0, z)$ 为大气分子消光系数; $\nu$ 为气溶胶消光波长指数,通常假

设气溶胶消光系数随波长的关系为 $a_p(\lambda_0) \propto \lambda^{-\nu}$ , $\nu$ 值一般在 0.5~2.0 之间,常常假设为常数 1.0<sup>[8]</sup>; $\sigma$ 是大气分子的消光波长指数为 4;几何因子  $f(z)$ 可根据胡顺星老师提出的 Raman-Mie 方法确定<sup>[9]</sup>;设  $N(z)$ 为大气分子的数密度,由于  $N_2$  在 0~100km 高度范围内在大气中的混合比可视为常数,可设  $N_{N_2}(z) = mN(z)$ 。根据上述条件,则公式(1)进一步简化为:

$$\alpha_p(\lambda_0, z) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda_N}{\lambda_0}\right)^{-\nu}} \left\{ \frac{d}{dz} (\ln N(z)) + \frac{d}{dz} [\ln f(z)] - \frac{d}{dz} [\ln(P(\lambda_N, z)Z^2)] - a_m(\lambda_0, z) \left[ 1 + \left(\frac{\lambda_N}{\lambda_0}\right)^{-\sigma} \right] \right\} \quad (2)$$

计算中大气分子的数密度  $N(z)$ 是精确求解气溶胶消光系数的重要参数,通常由探空或模式大气数据给出。探空数据固然可靠,但是费用较大,对于一般的探测点有一定难度,目前国际和国内通常采用标准模式大气数据。标准模式大气(standard atmosphere)是能够反映某地区(如中纬度)垂直方向上气温、气压、湿度等近似平均分布的一种模式大气。它能粗略地反映中纬度地区大气多年年平均状况,并得到一国或国际组织承认。多年来,国际上曾出现过多种大气模式,在国际上影响较大的是 1962 年和 1976 年的美国标准大气,该模式采用的海平面温度为 15℃;在 11 km 以下,高度每增加 100 m,温度降低 0.65℃;在 11~20 km 范围内,温度保持 -56.6℃。然而模式数据由于季节、纬度和海拔与激光雷达探测地的差异,不可避免地会影响拉曼雷达探测气溶胶消光系数的精度,有时甚至会引引起计算出的消光系数为负值。

拉曼雷达有效探测范围往往在对流层内,基于玻耳兹曼能量分布规律和对流层大气温度线性递减的特征,对拉曼雷达求解方程中大气密度项进行了研究和转换。

### 1.2 大气密度项的转换

利用玻耳兹曼能量分布规律导出的大气密度随高度分布公式为<sup>[10]</sup>:

$$N(z) = N(0) e^{\frac{-mgz}{kT(z)}} \quad (3)$$

式中: $N(0)$ 为地面空气分子数密度; $m$ 为气体分子的质量(kg), $m = \frac{\mu}{N_A}$ , $N_A$ 为阿伏加德罗常数, $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ; $\mu$ 为气体的摩尔质量,对于空气  $\mu = 28.96 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ; $g$ 为重力加速度; $k$ 为玻耳兹曼常数,

$k=1.380\ 68\times 10^{-23}\text{ J/K}$ ,  $T_{(z)}$ 为大气热力学温度。把公式(3)代入  $\ln N_{(z)}$ 中,则有:

$$\ln N_{(z)}=\ln N_{(0)}-\frac{mgz}{kT_{(z)}} \quad (4)$$

由于对流层内大气温度一般随高度的增加而递减,其递减率平均约  $6.5\text{ K/km}^{[1]}$ 。可认为其温度线性递减。若设  $T_0$ 为地面温度,则空间高度  $z$ 处的大气温度  $T_{(z)}$ 可以记为  $T_{(z)}=T_{(0)}-6.5Z$ 。

$$\frac{d}{dz}(N_{(z)})=-\frac{mg}{k}\cdot\frac{T_0}{(T_0-6.5Z)^2}=-34.15\frac{T_0}{(T_0-6.5Z)^2} \quad (5)$$

通过上式可以看出,在求解 Raman 回波方程中,根据以上理论推导,处理  $\frac{d}{dz}(\ln N_{(z)})$ 时则可以不再引入大气分子数密度值,而转换成把地面温度  $T_0$ 和空间高度  $z$ 两个参数代入公式(5),即可求得空间任一点的  $\frac{d}{dz}(\ln N_{(z)})$ 值,计算过程较简洁。这样公式(2)拉曼雷达对流层探测最终可转换为:

$$\alpha_p(\lambda_0, z)=\frac{1}{1+\left(\frac{\lambda_N}{\lambda_0}\right)^{-1}}\left\{\frac{-34.15T_0}{(T_0-6.5Z)^2}+\frac{d}{dz}[\ln f(z)]-\frac{d}{dz}[\ln P(\lambda_N, z)Z^2]-a_m(\lambda_0, z)\left[1+\left(\frac{\lambda_N}{\lambda_0}\right)^{-4}\right]\right\} \quad (6)$$

为叙述方便,暂称其为玻-温模式。

### 1.3 实验验证

为检验这种转换的可行性,以 L625 Raman 激光雷达的实际探测信号(2008.9.21)为例,分别采用玻-温模式和当天的探空数据计算气溶胶消光系数廓线。图 1 给出了采用玻-温模式和采用无线电探空仪探空分子数密度分别计算得到的 355 nm 波长的大气气溶胶消光系数及误差。当时地面温度为 302 K,两种方法求导距离均为 30 m,信号平滑距离 3.6 km 里以下 210 m,以上 480 m。以探空数据计算的消光系数为真值,由图 1 可以看出,两种方法计算结果大部分符合得很好,几乎一致,5 km 以下应用玻-温模

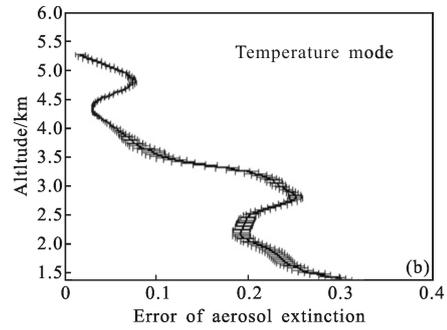
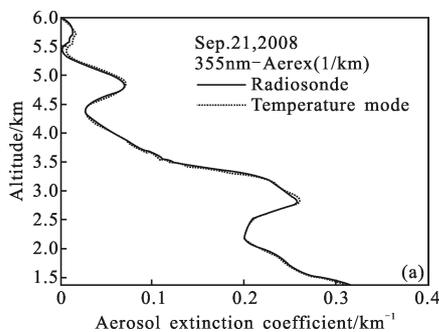


图 1 应用探空数据与玻-温模式计算的气溶胶消光系数廓线和应用温度模式与探空数据计算气溶胶消光系数的差异  
Fig.1 Extinction coefficient profiles of Radiosonde data and B-Temperature model and error of B-Temperature mode

式计算的消光系数与真值间绝对误差大部分在正负  $0.011/\text{km}$  以内,计算取得了较好的结果,初步验证玻-温模式是可行的,而且具有较好的准确性。当然,以上方法是建立在对流层温度递减规律基础上,如果出现逆温层,这种方法就不再适用,最好采用探空数据。

## 2 应用玻-温模式与标准模式大气结果对比

### 2.1 数值分析

对于一般的激光雷达探测而言,由于探空费用较大,受条件限制很难获得实时的探空数据,所以反演时一般采用标准模式大气分子数密度。为估计引用标准模式大气分子数密度对求解气溶胶消光系数的影响大小,基于以上方法进行了定量的数值分析。

假设对流层大气满足以下条件:(1) 温度递减率为  $6.5\text{ K/km}$ ;(2) 地面大气温度为  $T_0\text{ K}$ ;(3) 大气稳定;在上述条件下,气溶胶消光系数模拟真值  $\alpha_{\text{真}}(\lambda_0, z)$ 则可以满足下式:

$$\alpha_{\text{真}}(\lambda_0, z)=\frac{1}{1+\left(\frac{\lambda_N}{\lambda_0}\right)^{-1}}\left\{\frac{-34.15T_0}{(T_0-6.5Z)^2}+\frac{d}{dz}[f(z)]-\frac{d}{dz}[\ln P(\lambda_N, z)Z^2]-a_m(\lambda_0, z)\left[1+\left(\frac{\lambda_N}{\lambda_0}\right)^{-4}\right]\right\} \quad (7)$$

对于相同的信号,忽略分子消光系数差别,大气密度采用标准模式大气代入拉曼回波方程,则得到运用标准模式大气计算的消光系数  $\alpha_{\text{标}}(\lambda_0, z)$ :

$$\alpha_{\text{标}}(\lambda_0, z)=\frac{1}{1+\left(\frac{\lambda_N}{\lambda_0}\right)^{-1}}\left\{\frac{-34.15\cdot 288}{(288-6.5Z)^2}+\frac{d}{dz}[f(z)]-\right.$$

$$\frac{d}{dz} [\ln P(\lambda_N, z) Z^2] - a_m(\lambda_0, z) \left[ 1 + \left( \frac{\lambda_N}{\lambda_0} \right)^{-4} \right] \quad (8)$$

标准模式大气规定：海平面温度为 288 K；在 11 km 以下，高度每增加 1 km，温度降低 6.5 K。标准模式大气分子数密度随高度分布表达式为：

$$N(z) = N(0) e^{-\frac{mgz}{(288-6.5z)k}} \quad (9)$$

以公式(7)  $\alpha_{真}(\lambda_0, z)$  模拟消光系数为真值，则采用标准模式大气数据引起的消光系数与模拟真值差别为：

$$\Delta\alpha_p(\lambda_0, z) = \left| \frac{34.15}{1 + \left( \frac{\lambda_N}{\lambda_0} \right)^{-1}} \left[ \frac{288 + \Delta T}{(288 + \Delta T - 6.5Z)^2} - \frac{288}{(288 - 6.5Z)^2} \right] \right| \quad (10)$$

式中： $\Delta T$  为标准模式大气和模拟实际大气地面温差。

当地面大气温度与标准模式大气差别为 10 K 和 20 K 时，计算出采用标准模式大气得到的消光系数与模拟真值差别如图 2 所示：从图可以看出：(1) 对流层内随高度  $z$  的增加，消光系数差别逐渐增大；(2) 标准模式大气和模拟实际大气地面温差  $\Delta T$  越大与真值差别也就增大，高度越高，对于结果的影响就越大。当温差是 10 K 时，至少有 0.0021/km 的误差，温差是 20 K 时，至少有 0.0041/km 的误差。

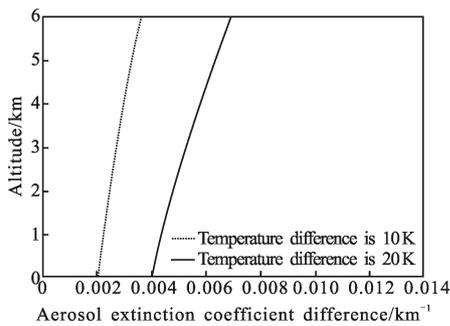


图 2 温差 10 K 和 20 K 时，应用标准模式大气计算的消光系数与模拟真值差别

Fig.2 Difference between application of standard atmosphere and true value as temperature difference is 10 K and 20 K

### 2.2 实验对比

以 2008 年 9 月 21 日 Raman 激光雷达的探测结果为例，若取无线电探空仪探空分子数密度得到的气溶胶消光系数为真值，则此时采用标准模式大气分子数密度计算的气溶胶消光系数与真值的相对差别如图 3 所示。当时地面温度为 297 K，与标准模式

大气温差为 5 K。从图可以看出，在高度 3.41~4.69 km，相对差异超过了 5%，在高度 4.33 km 左右相对差异甚至达到了 15%，而应用温度模式计算的消光系数 5 km 以下与真值间相对误差大部分在正负 5% 以内，验证了采用温度模式可以比标准模式大气提高计算气溶胶消光系数的准确度。

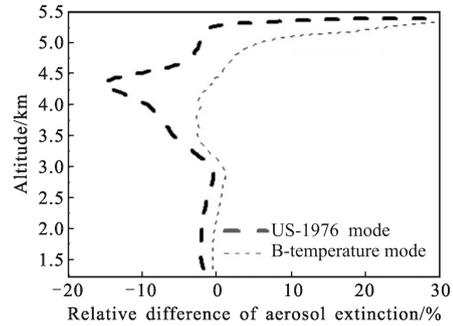


图 3 应用标准模式大气气溶胶消光系数与探空数据计算相对差异

Fig.3 Relative difference of extinction coefficient applying standard atmosphere

由以上分析可以得知，采用玻-温模式可以在拉曼雷达反演使大气密度与实际更加吻合，比传统采用标准大气考虑得更加细致，因而可以提高拉曼雷达探测的精确度，这为拉曼激光雷达反演气溶胶消光系数提供了一种新模式。

### 3 结论

根据对流层大气温度符合线性递减的特点，利用大气分子密度进行了转换，对这种转换进行了详细的理论推导，并将其计算结果与采用无线电探空用玻耳兹曼能量分布规律对拉曼方程中反演参数数据计算的结果进行了比较，二者吻合得很好，实验检验此方法是可行的，这为拉曼激光雷达反演气溶胶消光系数提供了一种新模式。另外根据此模式和传统采用标准模式进行了对比，初步发现新模式比传统采用标准模式大气的结果精度高。此方法更多地考虑了探测地点的季节和地理海拔因素，与标准模式大气相比更符合雷达探测地的实际大气情况，可以进一步提高拉曼雷达探测气溶胶的精确性，另外也避免了气象探空气球的高额费用，具有实用和经济的特点，这无疑更加有利于拉曼雷达的发展和实际应用。

## 参考文献:

- [1] Cheng Xuewu, Yang Guotao, Yang Yong, et al. Na layer and K layer simultaneous observation by lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(2): 0214001. (in Chinese)  
程学武, 杨国韬, 杨勇, 等. 高空钠层、钾层同时探测的激光雷达[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0214001.
- [2] Cao Kaifa, Zhao Bo, Fang Xin, et al. Fluorescence lidar for remote monitoring of plant[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(2): 130-133.
- [3] Ansmann A, Riebesel M, Weitkamp C. Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar [J]. *Opt Lett*, 1990, 15: 746-748.
- [4] Whiteman D N, Melfi S H, Ferrare R A. Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere [J]. *Appl Opt*, 1992, 31(16): 3068-3082.
- [5] Fernald F G. Analysis of atmosphere lidar observation: some comments[J]. *Appl Opt*, 1984, 23(5): 652-653.
- [6] Bo Guangyu, Xie Chenbo, Liu Dong, et al. Optical properties of aerosol in planetary boundary layer measured by Raman lidar at Hefei in summer and autumn[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(10): 2526-2532. (in Chinese)  
伯广宇, 谢晨波, 刘东, 等. 拉曼激光雷达探测合肥地区夏秋季边界层气溶胶的光学性质[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2526-2532.
- [7] Hua Dengxin, Song Xiaoquan. Advances in lidar remote sensing techniques [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 21-26. (in Chinese)  
华灯鑫, 宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 21-26.
- [8] Ferrare R A, Melfi S H, Whiteman C N, et al. Raman lidar measurements of aero-sol extinction and backscatter 1. Methods and comparisons [J]. *J Geophys Res*, 1998, 103: 19663-19672.
- [9] Hu Shunxing, Wang Xiaobin, Wu Yonghua, et al. Geometrical form factor determination with Raman backscattering signals [J]. *Optics Letters*, 30(14): 1879-1881.
- [10] Xue Datong. Studies of altitude distribution of earth's atmosphere density [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2009, 29: 6-7. (in Chinese)  
薛大同. 对地球大气密度随高度分布规律的讨论[J]. 真空科学与技术学报, 2009, 29: 6-7.
- [11] Sun Jingqun. Laser Atmosphere Detect [M]. Beijing: Science Press, 1986: 2-3. (in Chinese)  
孙景群. 激光大气探测[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 2-3.