

文章编号: 1001-3806(2008)06-0667-03

## RML 探测大气气溶胶波长指数的不确定分析

闫顺生, 胡顺星, 胡欢陵\*, 钟志庆

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所 大气光学中心, 合肥 230031)

**摘要:** 为了提高喇曼-米散射激光雷达探测大气气溶胶波长指数的精确度, 利用不确定度传递公式对其不确定性进行了详细的理论分析, 并结合喇曼-米散射激光雷达在合肥西郊的实际探测例子进行了实验研究, 计算了信号、大气透过率比值和散射比参考值的相对不确定度, 在高度 6km 以下信号相对不确定度一般小于 3%, 透过率比的相对不确定度一般小于 4%, 散射比参考值相对不确定度大小则由参考值与实际值差异而定。结果表明, 适当增大激光脉冲能量和延长信号采集累计时间、准确标定散射比参考值可有效减小喇曼-米散射激光雷达探测大气气溶胶波长指数的不确定性。

**关键词:** 大气与海洋光学; 大气气溶胶; 喇曼-米散射激光雷达; 波长指数; 不确定度

中图分类号: O648.18 TN958.98 文献标识码: A

### Uncertainty analysis of aerosol wavelength exponent measured by Raman-Mie lidars

YAN Shun-sheng, HU Shun-xing, HU Huan-ling, ZHONG Zhi-qing

(Center of Atmospheric Optics Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics Chinese Academy of Sciences Hefei 230031, China)

**Abstract** In order to improve the measuring accuracy of aerosol wavelength exponent measured by Raman-Mie lidar (RML), the uncertainty propagation formula was used to analyze the uncertainty in detail. The uncertainties of signal transmission ratio and assumed scattering ratio  $R_c$  were calculated based on the data measured over the west suburb of the city of Hefei. Commonly below 6km, assuming the relative uncertainty of reference value of the scattering ratio  $R_c$  was defined by the difference between the reference and real values, the uncertainty of the signal and the transmission ratio was less than 3% and 4% respectively. The analytical results showed that the uncertainty of aerosol wavelength exponent could be reduced by increasing pulsed laser energy, probing signal collecting time and more accurately determining assumed  $R_c$ .

**Key words** atmospheric and ocean optics; aerosol; Raman-Mie lidar; wavelength exponent; uncertainty

### 引 言

大气气溶胶波长指数与粒子半径有着密切的关系, 可以反演大气气溶胶模态特征与谱分布, 是表征大气气溶胶光学特征的最基本参量之一。OKADA 等利用 Seastar 卫星资料分析了印度古杰拉特地区 2001-01-26 7.8 级地震后的大气气溶胶波长指数特征<sup>[1]</sup>; 国内 WANG 等利用 2004 年秋冬季全国太阳分光观测网资料对 19 个典型区域大气气溶胶的波长指数变化特征进行研究<sup>[2]</sup>, ZHAO 等利用 L97 光度计资料分析了兰州市大气污染状况与波长指数的关系<sup>[3]</sup>。

上述探测办法均通过卫星遥感或太阳光度计资料反演出波长指数, 但局限于给出整层大气气溶胶的波长指数, 而激光雷达是一种主动遥感手段, 可以得到波

长指数的空间垂直分布信息。但由于激光雷达昂贵, 国内采用雷达探测波长指数很少, BAI 等曾用米散射激光雷达探测了拉萨上空大气气溶胶的波长指数<sup>[4]</sup>。

中国科学院安徽光机所大气光学中心采用喇曼-米散射激光雷达 (Raman-Mie lidar RML) 在合肥西郊对波长指数进行了长期探测, 与米散射激光雷达相比, 数据反演时假设参量少、测量精度高。作者将结合 RML 对于探测大气气溶胶波长指数及其不确定性进行一些理论和实验方面的研究和讨论。

### 1 RML 探测波长指数基本方程

RML 发射 355nm 波长时, 两个接收通道同时接收米散射信号 (355nm) 和  $N_2$  分子的喇曼散射信号 (386nm); 发射 532nm 波长时, 接收通道同时接收米散射 (532nm) 和  $N_2$  分子喇曼散射 (607nm) 回波信号。计算大气气溶胶散射比和后向散射系数的表达式如下<sup>[5-6]</sup>:

$$R(\lambda_0, z) = \frac{p(\lambda_0, z)}{p(\lambda_N, z)} R_c \frac{p(\lambda_N, z_c) T(\lambda_0, z, z_c)}{p(\lambda_0, z_c) T(\lambda_N, z, z_c)} \quad (1)$$

作者简介: 闫顺生 (1977-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: hshu@aoifm.ac.cn

收稿日期: 2007-07-04 收到修改稿日期: 2007-10-09

$$\beta_a(\lambda_0, z) = [R(\lambda_0, z) - 1] \times \beta_m(\lambda_0, z) \quad (2)$$

式中,  $R(\lambda_0, z)$  为高度  $z$  处波长  $\lambda_0$  的大气气溶胶散射比,  $p(\lambda_0, z)$  为米散射回波信号强度,  $p(\lambda_N, z)$  为  $N_2$  分子喇曼散射回波信号强度,  $z_c$  为参考高度,  $R_c$  为在参考高度上的散射比, 称为散射比参考值,  $T(\lambda_0, z, z_c)$ ,  $T(\lambda_N, z, z_c)$  分别对应高度  $z$  和  $z_c$  之间波长  $\lambda_0$ ,  $\lambda_N$  时的大气透过率,  $T(\lambda_0, z, z_c) / T(\lambda_N, z, z_c)$  代表在  $z \sim z_c$  高度范围内两个波长的透过率比值,  $\beta_a(\lambda_0, z)$  和  $\beta_m(\lambda_0, z)$  分别为大气气溶胶和大气分子后向散射系数。

记  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为两个发射激光波长, 一般情况下散射比和波长有如下关系<sup>[7]</sup>:

$$v(z) = 4 - \ln\{[R(\lambda_1, z) - 1] /$$

$$\Delta v(z) = \frac{1}{\ln(\lambda_1 / \lambda_2)} \times \sqrt{\left[\frac{\delta R(\lambda_b, z)}{R(\lambda_b, z)}\right]^2 \times \left[\frac{R(\lambda_1, z)}{R(\lambda_b, z) - 1}\right]^2 + \left[\frac{\delta R(\lambda_2, z)}{R(\lambda_2, z)}\right]^2 \times \left[\frac{R(\lambda_2, z)}{R(\lambda_2, z) - 1}\right]^2} \quad (4)$$

再由散射比表达式 (1) 式进一步整理可得:

$$\Delta v(z) = \frac{1}{\ln(\lambda_1 / \lambda_2)} \times \sqrt{\left[\frac{\delta p(z)}{p(z)}\right]^2 + \left[\frac{\delta R_c(z)}{R_c(z)}\right]^2 + \left[\frac{\delta T(z)}{T(z)}\right]^2} \quad (5)$$

式中,  $\delta p(z) / p(z)$  是回波信号相对不确定度,  $\delta R_c(z) / R_c(z)$  是参考值相对不确定度,  $\delta T(z) / T(z)$  是透过率比相对不确定度。

不确定因素包括喇曼-米散射回波信号噪声, 参考标定值及透过率比的不确定性。另外,  $R(\lambda_b, z) / [R(\lambda_1, z) - 1]$  和  $R(\lambda_2, z) / [R(\lambda_2, z) - 1]$  两个因子对不确定度起了放大作用, 尤其当散射比很接近 1 时。

以下结合 RML 具体分析各个不确定度。

2.1.1 信号相对不确定度 回波信号相对不确定度可表示为:

$$\left[\frac{\delta p(z)}{p(z)}\right]^2 = \left\{ \left[\frac{\delta p(\lambda_{532}, z)}{p(\lambda_{532}, z)}\right]^2 + \left[\frac{\delta p(\lambda_{607}, z)}{p(\lambda_{607}, z)}\right]^2 \right\} \times \left[\frac{R(\lambda_{532}, z)}{R(\lambda_{532}, z) - 1}\right]^2 + \left\{ \left[\frac{\delta p(\lambda_{355}, z)}{p(\lambda_{355}, z)}\right]^2 + \left[\frac{\delta p(\lambda_{386}, z)}{p(\lambda_{386}, z)}\right]^2 \right\} \times \left[\frac{R(\lambda_{355}, z)}{R(\lambda_{355}, z) - 1}\right]^2 \quad (6)$$

式中,  $p(\lambda, z)$  是回波信号的强度,  $\delta p(\lambda, z)$  是每个回波信号的不确定度,  $x$  是波长参量 (532nm, 607nm, 355nm 和 386nm), 其中  $\delta p(\lambda, z) / p(\lambda, z)$  的计算式为<sup>[8]</sup>:

$$\frac{\delta p_\lambda}{p_\lambda} = \frac{\sqrt{N_\lambda + N_d + N_b}}{N_\lambda} \quad (7)$$

式中,  $N_\lambda$  是回波信号的计数值,  $N_d$  是光电倍增管的暗计数,  $N_b$  是背景辐射产生的计数,  $N_\lambda$ ,  $N_d$  和  $N_b$  均为在发射大量激光脉冲数情况下的累加值。

2.1.2 参考值相对不确定度 参考值相对不确定度可表示为:

$$[R(\lambda_2, z) - 1] / \ln(\lambda_1 / \lambda_2) \quad (3)$$

式中,  $v$  为大气气溶胶波长指数, 它与粒子半径大小有密切关系。一般, 大粒子对应的  $v$  值较小, 小粒子对应的  $v$  值较大 (对于大气分子,  $v = 4$ )。

由 (3) 式可以看出, 如果根据喇曼-米散射方法 (1) 式分别计算出 355nm 和 532nm 波长相应的散射比, 然后通过 (3) 式就可以计算出波长指数  $v$ 。

## 2 不确定性分析

### 2.1 波长指数的不确定性因子

由波长指数表达式 (3) 式, 根据不确定度传递公式, 可得其不确定度为:

$$\left[\frac{\delta R_c(z)}{R_c(z)}\right]^2 = \left[\frac{\delta R_{c,532}}{R_{c,532}}\right]^2 \times \left[\frac{R(\lambda_{532}, z)}{R(\lambda_{532}, z) - 1}\right]^2 + \left[\frac{\delta R_{c,355}}{R_{c,355}}\right]^2 \times \left[\frac{R(\lambda_{355}, z)}{R(\lambda_{355}, z) - 1}\right]^2 \quad (8)$$

计算波长指数时, 取  $R_{c,532} = 1.02$ ,  $R_{c,355} = 1.002$ <sup>[9]</sup>。参考值  $R_c$  的相对不确定度大小由所取参考值与大气实际值差异所决定。

2.1.3 透过率比相对不确定度 透过率比相对不确定度可表示为:

$$\left[\frac{\delta T(z)}{T(z)}\right]^2 = \left[\frac{\delta T(\lambda_{532}, \lambda_{607}, z, z_c)}{T(\lambda_{532}, \lambda_{607}, z, z_c)}\right]^2 \times \left[\frac{R(\lambda_{532}, z)}{R(\lambda_{532}, z) - 1}\right]^2 + \left[\frac{\delta T(\lambda_{355}, \lambda_{386}, z, z_c)}{T(\lambda_{355}, \lambda_{386}, z, z_c)}\right]^2 \times \left[\frac{R(\lambda_{355}, z)}{R(\lambda_{355}, z) - 1}\right]^2 \quad (9)$$

式中,

$$\left[\frac{\delta T(\lambda_0, \lambda_N, z, z_c)}{T(\lambda_0, \lambda_N, z, z_c)}\right]^2 = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_N}\right)^2 \times \delta \tau_a(\lambda_0, z, z_c) + \left[\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_N}\right)^4 - 1\right]^2 \times \delta \tau_m(\lambda_0, z, z_c) \quad (10)$$

式中,  $\lambda_0$  和  $\lambda_N$  分别代表米散射和  $N_2$  分子喇曼散射波长,  $\delta \tau_a(\lambda_0, z, z_c)$  和  $\delta \tau_m(\lambda_0, z, z_c)$  分别代表大气气溶胶和大气分子散射光学厚度的不确定度, 从 (10) 式可以看出, 大气分子不确定项中由于弹性散射和喇曼散射波长相差不大,  $\lambda_0 / \lambda_N$  比值接近于 1 且为 4 次幂, 所以大气分子消光对透过率比不确定度的贡献不大。

$\delta \tau_a(\lambda_0, z, z_c)$  和  $\delta \tau_m(\lambda_0, z, z_c)$  可估计为<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} \delta \tau_a(\lambda_0, z, z_c) = 0.5 \tau_a(\lambda_0, z, z_c) \\ \delta \tau_m(\lambda_0, z, z_c) = 0.1 \tau_m(\lambda_0, z, z_c) \end{cases} \quad (11)$$

### 2.2 RML 探测波长指数不确定性分析

图 1 中给出了 2007-05-20 晚 RML 探测大气气溶胶散射比与影响波长指数的各个不确定度的垂直廓线。图 1a 是 532nm 与 355nm 两个波长的大气气溶胶

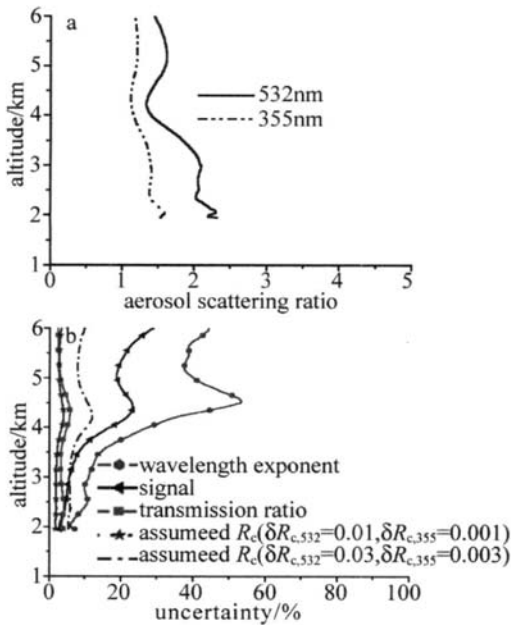


Fig 1 Profiles of aerosol scattering ratio and uncertainty of signal transmission ratio, assumed  $R_c$  and wavelength exponent by RML during the nighttime in 2007-05-20

散射比。图 1b 中, 各个不确定度都在高度大约 4.3 km 处有一明显较大突起, 这是由于此处大气气溶胶含量较少, 散射比较小,  $R(\lambda_{532}, z)/[R(\lambda_{532}, z) - 1]$  和  $R(\lambda_{355}, z)/[R(\lambda_{355}, z) - 1]$  两个因子放大作用较强引起的。

信号不确定度总体趋势随高度升高而增大, 这主要是由于回波信号随高度升高而信噪比减弱的原因; 在高度 6 km 以下不确定度小于 30%, 4.41 km 以下小于 25%, 对波长指数不确定度影响相对较大。透过率比的不确定度在最大处为 5.8%, 一般小于 4%, 可见它对波长指数影响相对较小。

由于  $R_c$  的取值与大气实际值有差异, 所以也会带来一定的不确定性。为了分析  $R_c$  取值对参考值不确定度的影响, 分别令  $R_{c,532}$  变化 0.01,  $R_{c,355}$  变化 0.001, 即相当于大气气溶胶参考后向散射系数  $\beta_a(\lambda_0, z)$  都变化了 0.5 倍时, 计算此时的参考值不确定度, 在 6 km 高度范围内, 参考值相对不确定度基本小于 4%; 如果令  $R_{c,532}$  变化 0.03,  $R_{c,355}$  变化 0.003, 即相当于参考后向散射系数  $\beta_a(\lambda_0, z)$  都变化了 2.5 倍时, 参考值的相对不确定度最大处几乎快要上升到了 12% (虚线), 可见  $R_c$  的准确标定也很重要。

高度 4 km 以下波长指数的相对不确定度小于 30%, 而 6 km 高度内的不确定度大部分在 5% 至 45% 之间。总之, 一般情况下信号噪声对大气气溶胶波长指数带来的影响较大, 而透过率比不确定性带来的影响较小, 散射比参考值的影响大小则由其与实际大气值差异而定。

### 3 波长指数探测结果及分析

图 2 中给出 2007-05-20 晚用 RML 探测后向散射系数及波长指数结果。由图 2a 可以看出, 两个波长处

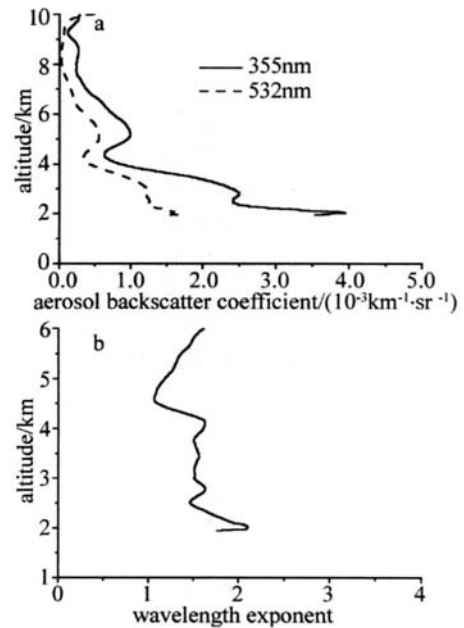


Fig 2 Profiles of aerosol backscatter coefficient and wavelength exponent detected by RML during the nighttime in 2007-05-20

的大气气溶胶后向散射系数分布结构比较类似, 355 nm 波长后向散射系数因为波长短而比较大。由图 2b 可看出, 在 2.2 km 至 4 km 高度范围内, 分布着一层较均匀的大气气溶胶, 在 1.95 km 至 6 km 高度范围内, 波长指数平均值为 1.47, 对应粒子半径在 0.5  $\mu\text{m}$  左右<sup>[10]</sup>; 波长指数小于 2 说明大粒子较多, 这是因为近地面受人为源和自然源影响相对较大的缘故。

### 4 结论

波长指数与大气气溶胶粒子直径大小密切相关, 是表征大气气溶胶光学特性的基本参量, 尤其在监测城市大气污染和沙尘暴时, 具有重要的参考价值。RML 探测大气气溶胶波长指数具有能够连续探测其不同高度分布且空间分辨率相对较高的优点, 经上述不确定性分析, 可见信号噪声和散射比参考值对波长指数影响较大, 在今后常规实验中, 将会适当增大激光脉冲能量和延长信号采集累计时间, 并进一步准确标定  $R_c$  值。

#### 参考文献

- [1] OKADA Y, MUKAIS SINGH R P. Changes in atmospheric aerosol parameters after Gujarat earthquake of January 26 2001 [J]. Advances in Space Research, 2004, 33(3): 254-258
- [2] WANG Y S, XIN J Y, LI Zh Q, et al. Aod and angstrom parameters of aerosol observed by the Chinese sun hazer meter Network from august to december 2004 [J]. Environmental Science, 2006, 27(9): 1703-1710 (in Chinese).

(下转第 672 页)

$\rho_2$  漫反射率误差  $\Delta\rho_2$ 、距中心  $O$  距离  $L_2$ ) 组合使用时, 误差  $\Delta L$  估算如下。

考虑极限情况, 两块光斑靶板漫反射率重心偏向同一侧时, 适当简化后误差  $\Delta L$  为:

$$\Delta L = \frac{|\rho_1 S_1 \Delta L_1| + |L_1 S_1 \Delta \rho_1| + |\rho_2 S_2 \Delta L_2| + |S_2 L_2 \Delta \rho_2|}{\rho_1 S_1 + \rho_2 S_2} \quad (9)$$

设靶板 1 为方形低漫反射率, 靶板 2 为圆形高漫反射率,  $\rho_1 = 0.642$ ,  $\Delta\rho_1 = 3.7 \times 10^{-4}$ ,  $\rho_2 = 0.953$ ,  $\Delta\rho_2 = 5.5 \times 10^{-4}$ ,  $L_1 = L_2 = 0.3\text{m}$ ,  $\Delta L_1 = \Delta L_2 = 1.78\text{mm}$ , 两块组合使用时, 由 (9) 式得激光模拟靶漫反射率重心位置误差  $\Delta L = 1.79\text{mm}$ 。激光模拟靶精度满足检测要求。

为使激光模拟靶工作在漫反射区域, 使用时应控制靶板与阳光夹角和靶板与激光监测系统夹角皆在  $45^\circ$  内, 保证测量精度。

### 3 结 论

CCD(加装  $1.06\mu\text{m}$  窄带) 测量  $1.06\mu\text{m}$  连续光能量分布与  $1.06\mu\text{m}$  激光能量分布在原理上是一致的, 精度是相等的; 用阳光做光源, 模拟光斑重心与其漫反射率重心位置一致, 这两点是激光模拟靶的理论基础, 使分析和计算激光模拟靶的检测精度变得简单易行。

使用阳光作光源, 用激光模拟靶检测激光监测系

统测量精度的方法科学可行。该方法操作简单易行, 检测精度高, 不仅仅局限于波长  $1.06\mu\text{m}$  激光监测系统的标定, 也适用于其它波长的基于 CCD 器件的激光监测系统, 为此类激光监测系统提供了一种普遍适用的外场检测方法。

### 参 考 文 献

- [1] WANG W, CHEN H X. Inhibiting noise of light spot image [J]. Laser Technology, 2007, 31(1): 55-56 (in Chinese).
- [2] GONG H P, LÜ Zh W, LN D Y. CCD digital image preprocessing in measurement of laser beam intensity distribution [J]. Journal of Laser Optoelectronics\* Laser, 2007, 18(1): 125-126 (in Chinese).
- [3] WANG Ch Y, LI J Sh. Detection of laser spot drift [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(2): 205-207 (in Chinese).
- [4] WAN D A. The technology of high accuracy measurement using laser beam as a straight [M]. Beijing National Defence Industry Press, 1999, 2-12 (in Chinese).
- [5] WANG Q Y. Application technology of CCD [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000, 120-147 (in Chinese).
- [6] ZOU W J, ZHU G L, WEI X B. Angle measuring system of laser on array CCD [J]. Optoelectronic Engineering, 2006, 33(10): 92-94 (in Chinese).
- [7] FU Y C, DING X, LU Zh Y. Method of target laser reflectivity measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 1215-1216 (in Chinese).
- [8] MIAO Ch Q, WANG B, FUM Y. Real time image tracking system for moving targets by CCD [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(3): 310-313 (in Chinese).
- [9] HU L T, LIU X K, JIN J K, et al. Laser focal measurement with CCD [J]. Laser Technology, 2001, 25(2): 154-155 (in Chinese).
- [3] ZHAO X J, CHEN Ch H, YUAN T, et al. Lanzhou aerosol optical depth in winter and their relation with visibility [J]. Plateau Meteorology, 2005, 24(4): 617-622 (in Chinese).
- [4] BAI Y B, SHI G Y, KOICHI IT, et al. Lidar observations of atmospheric aerosol properties over Lhasa [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, 24(4): 559-567 (in Chinese).
- [5] WHITEMAN D N, MELFISH, FERRARE R A. Raman lidar system for the measurements of water and aerosols in the earth's atmosphere [J]. Appl Opt, 1992, 31(16): 3068-3082.
- [6] ZHONG Zh Q, ZHOU J, SUN D S, et al. The research of error analysis and simulation of aerosol detected by MPL [J]. Laser Technology, 2006, 30(3): 232-234 (in Chinese).
- [7] COLLINS R L, BROWN K P, GARDNER C S. Polar stratospheric clouds at the south pole in 1990s: lidar observation and analysis [J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(1): 1001-1010.
- [8] KLETT J. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. Appl Opt, 1981, 20(2): 211-220.
- [9] RUSSELL P B, SWISSE T J, MCCORMICK M P. Methodology for error analysis and simulation of lidar aerosol measurements [J]. Appl Opt, 1979, 18(22): 3783-3797.
- [10] YIN H. Atmospheric radiation basic [M]. Beijing Meteorological Press, 1993: 144-145 (in Chinese).

(上接第 669 页)