

文章编号: 0253-2239(2007)08-1349-6

# 纯转动拉曼法确定激光雷达几何因子<sup>\*</sup>

曹开法 杜小勇 汪少林 苏 嘉 赵培涛 胡顺星

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 提出了一种确定激光雷达几何重叠因子的新方法。研究了大气分子纯转动拉曼谱线强度分布特征。利用大气分子总的纯转动拉曼激光雷达信号结合瑞利-米氏散射激光雷达信号能精确反演激光雷达几何因子。这种方法消除了振动拉曼方法中气溶胶波长指数影响以及水平测量法气溶胶非均匀性的限制。数值模拟结果表明:在大气温度三种分布模型和气溶胶波长指数三种分布模型下几何因子反演的最大相对误差小于 0.5%。根据实际激光雷达信号反演得到了系统的几何因子。

**关键词:** 大气与海洋光学; 几何因子; 纯转动拉曼散射; 米氏散射; 气溶胶

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A

## Determination of Lidar Geometric form Factor with Pure Rotational Raman Scattering Signal

Cao Kaifa Du Xiaoyong Wang Shaolin Su Jia Zhao Peitao Hu Shunxing

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

**Abstract:** A new method was presented to determine lidar geometric form factor. The intensity distribution characteristic of pure rotational Raman spectra at different temperature is studied. Lidar geometric form factor can be determined accurately with the sum of pure rotational Raman lidar signal and the Rayleigh-Mie lidar signal of atmospheric molecules. The method reduces aerosol wavelength exponent effect compared with vibrational Raman method and aerosol uniformity limit in contrast to horizontal determination method. The numerical simulation shows that the maximum relative error of geometric form factor retrieved from three kinds of temperature distribution modes and three kinds of aerosol wavelength exponent distribution modes is less than 0.5%. The lidar deomenic form factor is determined with real lidar aignal.

**Key words:** atmospheric and ocean optics; geometric form factor; pure rotational Raman scattering; Mie scattering; aerosol

### 1 引 言

激光雷达为高时空分辨力的气溶胶测量提供了有效手段。但激光雷达本身结构固有的几何因子影响了近距离激光雷达数据的反演<sup>[1]</sup>。而近地面数据往往与人类关系也最密切最重要。几何因子的确定一直为近地面气溶胶激光雷达的使用者与研究者所关注<sup>[1~4]</sup>。

到目前为止,已经有理论分析、实验测量等很多方法来确定几何因子。1979年 Y. Sasano 等<sup>[2]</sup>提出在均匀大气中利用瑞利-米氏散射雷达方程计算

几何因子,这种方法必须要在水平大气气溶胶均匀状况下进行,并且气溶胶的不均匀分布会直接影响测量结果。1997年 Sang Whoe Dho 等<sup>[3]</sup>提出在不均匀大气中利用多项式拟合的方法测量几何因子,在这种方法中大气的后向散射系数和消光系数的求解需要假设气溶胶消光后向散射比,这会给几何因子求解带来一定的误差。2002年 Ulla Wandinger 等<sup>[4]</sup>提出利用振动拉曼测量几何因子,由于振动拉曼波长与激发波长有一定间隔,这种方法中对振动拉曼波长消光系数的计算需要假设气溶胶波长指

\* 国家 863 计划激光技术领域(2002AA135330)资助课题。

作者简介: 曹开法(1982-),男,安徽人,硕士研究生,主要从事激光雷达系统研究。E-mail: kaifa@ah163.com

导师简介: 胡顺星(1966-),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事激光雷达系统的研究。E-mail: Shxh@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2006-12-04; 收到修改稿日期: 2007-03-13

数,也会带来一定的误差。这里提出的方法利用高低阶量子数正反纯转动拉曼信号之和,消除了单谱线的温度敏感性。在反演几何因子中既不用局限在气溶胶分布均匀的状态下,同时相对于转动拉曼测量方法不需要假设气溶胶波长指数,为几何因子的测定提供新的方法和途径。

## 2 原理分析

### 2.1 大气分子的纯转动拉曼谱

基于纯转动拉曼温度激光雷达,在对流层温度廓线反演方面取得了很大的成功<sup>[5,6]</sup>。对于纯转动拉曼量子数为  $J$  的后向散射强度  $I$  可表示为

$$I(J, T) = I_0 A \gamma^2 \nu_J^4 g_I(J) N_0 \frac{Bhc}{(2I+1)^2 KT} (2J+1) \times \exp\left\{-\frac{Bhc}{kT} J(J+1) \times \left[1 - \frac{D}{B} J(J+1)\right]\right\} |H_J^I|^2, \quad (1)$$

其中  $I_0$  为发射光强度,  $B$  为分子转动常量,  $D$  为离心畸变常量,  $h$  为普朗克常量,  $c$  为真空中光速,  $T$  表示温度,  $A$  是常量,  $\gamma$  表示分子偏振强度的各向异性参量。  $\nu_J = \nu_0 + \nu_{RJ}$ ,  $\nu_{RJ}$  对应于量子数  $J$  的纯转动拉曼频移。对于斯托克斯线:  $\nu_{RJ} = (4J+6)B$  ( $J = 0, 1, 2, 3, \dots$ ); 对于反斯托克斯线:  $\nu_{RJ} = -(4J-2)B$  ( $J = 2, 3, 4, \dots$ )。  $N_0$  是基级量子态的分子数密度,  $g_I(J)$  是由于核自旋产生的纯转动拉曼统计权重,  $k$  是玻耳兹曼常量,  $|H_J^I|^2$  是对应于转动跃迁的平方矩阵:

$$\begin{aligned} \text{对于斯托克斯线: } (2J+1) |H_J^I|^2 &= \frac{3}{2} \frac{(J+1)(J+2)}{(2J+3)}, \quad (J = 0, 1, 2, 3, \dots) \\ \text{对于反斯托克斯线: } (2J+1) |H_J^I|^2 &= \frac{3}{2} \frac{(J-1)J}{(2J-1)}. \quad (J = 2, 3, 4, \dots) \end{aligned} \quad (2)$$

各参量值如表 1 所示。通过这些值可以计算出在一定温度下纯转动拉曼强度随量子数(即对应于拉曼频移量)的分布。本文计算了氮气分子在 200 K 和 300 K 温度下,由波长 532.1 nm 激光激发的纯转动拉曼信号相对强度的分布(如图 1 所示)。从图中可以看出在  $N_2$  分子弹性散射周围分布着数量众多的纯转动拉曼谱线。低阶量子数的纯转动拉曼信号强度随温度增加而减弱,高阶量子数的纯转动拉曼信号强度随温度增加而加强。

表 1  $B, D, g, \gamma^2$  和  $I$  的数值<sup>[5,6]</sup>  
Table 1 Values for  $B, D, g, \gamma^2$  and  $I$  <sup>[5,6]</sup>

Molecule	$B / \text{cm}^{-1}$	$D / \text{cm}^{-1}$	$G_I(J)$ ( $J$ as even)	$g_I(J)$ ( $J$ as odd)	$\gamma^2 / (10^{-48} \cdot \text{cm}^6)$	$I$
$N_2$	1.98950	$5.48 \times 10^{-6}$	6	3	0.509	1
$O_2$	1.43768	$4.85 \times 10^{-6}$	0	1	1.27	0

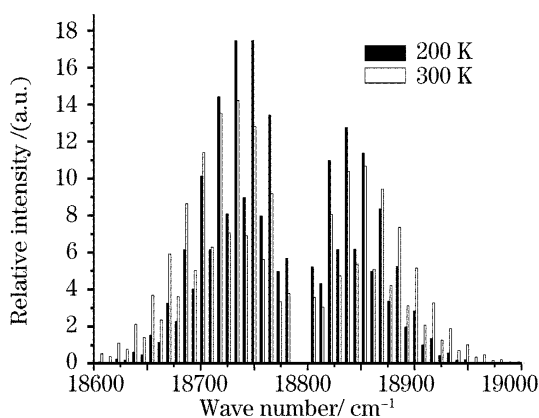


图 1 计算得到的氮气纯转拉曼信号强度随波长的分布

Fig. 1 Calculated pure Raman signal intensities versus wavelength for  $N_2$

### 2.2 叠加纯转动拉曼谱线的特征分析

将高低阶量子数的斯托克斯、反斯托克斯谱线进行叠加后,总的信号的温度影响特性用下式表

示为

$$\frac{\sum_{J=-100}^{+100} I(J, T_2) - \sum_{J=-100}^{+100} I(J, T_1)}{(T_2 - T_1) \sum_{J=-100}^{+100} I(J, T_1)}, \quad (3)$$

气溶胶波长指数对叠加信号的气溶胶消光系数的影响表示为

$$\frac{\sum_{J=-100}^{+100} I(J, T) \cdot \alpha_a[\lambda_J, \nu]}{\alpha_a[\lambda_0, \nu] \sum_{J=-100}^{+100} I(J, T)} = \frac{\sum_{J=-100}^{+100} I(J, T) \cdot \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_J}\right)^\nu}{\sum_{J=-100}^{+100} I(J, T)}, \quad (4)$$

$I(J, T)$  表示温度  $T$  下量子数为  $J$  的纯转拉曼谱线强度,  $J$  为负数表示量子数为  $-J$  的反斯托克斯纯转动拉曼谱线。  $\alpha_a[\lambda, \nu]$  表示气溶胶波长指数为  $\nu$ 、波长为  $\lambda$  处的气溶胶消光系数;  $\lambda_0$  表示激发波长,这里为 532.1 nm,  $\lambda_J$  表示波长  $\lambda_0$  激发的量子数为  $J$  纯转

动拉曼谱线的波长。(3) 式用来评估单位温度的改变所引起叠加信号的相对变化大小。(4) 式用来评估在气溶胶波长指数为  $V$  时, 叠加信号的气溶胶消光系数与折合激发波长处的气溶胶消光系数之比, 越接近于 1 对反演几何因子越好。(3) 式、(4) 式计算了量子数  $J$  从  $-100 \sim 100$  的纯转动拉曼信号, 量子数 100 以外的信号非常弱, 可以不考虑。

计算结果表明, 在  $200 \sim 350$  K 之间, 单纯转动拉曼谱线叠加后即总纯转拉曼后向散射系数的温度影响特征即(4)式小于  $4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , 可以忽略温度的影响。同时由于转动拉曼信号和激发波长相近且在激发波长两边均匀分布, 气溶胶波长指数在  $1.0 \sim 2.0$  之间引起的气溶胶消光系数相对变化即

$$P(z, \lambda_J) = O_J(z) \frac{C_J}{z^2} N(z) \beta(\lambda_J, T) \exp\left\{-\int_0^z [\alpha_a(\lambda_0, z') + \alpha_a(\lambda_J, z') + \alpha_m(\lambda_0, z') + \alpha_m(\lambda_J, z')] dz'\right\}, \quad (5)$$

同样瑞利-米氏散射激光雷达方程表示为

$$P(z, \lambda_0) = O(z) C_0 \frac{\beta_a(z) + \beta_m(z)}{z^2} \exp\left[-2 \int_0^z [\alpha_a(\lambda, z') + \alpha_m(\lambda_0, z')] dz'\right], \quad (6)$$

$P$  表示回波功率,  $z$  是距离。 $O$  是几何因子,  $C$  是雷达常量,  $\beta_a, \beta_m$  分别表示气溶胶和分子的后向散射系数,  $\beta(\lambda_J, T)$  是氮气或者氧气的单谱线  $\lambda_J$  在温度  $T$  下的后向纯转动拉曼散射系数。 $N(z)$  是氮气或者氧气的分子密度。 $\alpha_a, \alpha_m$  分别表示气溶胶和分子的消光系数。角标  $J$  对应氮气或氧拉曼纯转动拉曼量子数。

几何因子主要由发射光束和接收视场所决定, 一般后续光路不会影响几何因子, 所以弹性散射和拉曼散射几何因子相等  $O(z) = O_J(z)$ 。几何重叠因子在盲区为 0, 在过渡区从 0 随距离逐渐增长, 到一定距离后一直保持为 1。从 2.2 节分析可以看出, 大气分子总的纯转拉曼后向散射系数受温度影响很小, 可以忽略不计。对于转动拉曼波长的消光系数, 由于其波长与激发波长相差很小且在激发波长两端均匀分布, 因此总的效果可以看作与激光波长的消光系数几乎相同(如 2.2 节所述)。可以用激发波长的消光系数来替代叠加信号的消光系数

$$\alpha_a(\lambda_0, z) = \sum \alpha_a(\lambda_J, z), \quad \alpha_m(\lambda_0, z) = \sum \alpha_m(\lambda_J, z), \quad (7)$$

这样方程包含所有谱线的纯转动拉曼方程可写成

$$P(z, \lambda_R) = \sum_{J=-100}^{+100} \Gamma(\lambda_J) \cdot P(z, \lambda_J) = O_R(z) \frac{C_R}{z^2} N(z) \beta_0 \exp\left\{-\int_0^z 2[\alpha_a(\lambda_0, z') + \alpha_m(\lambda_0, z')] dz'\right\}, \quad (8)$$

$\Gamma(\lambda_J)$  为  $\lambda_J$  处的滤波器透射率, 这里设为常量。选取参考高度  $z_c$ , 此处满足  $O(z_c) = 1$  并且有足够的信噪比。由(8)式可以得到:

$$O_R(z) = \frac{P(z, \lambda_R) z^2 N(z_c)}{P(z_c, \lambda_R) z_c^2 N(z)} \cdot T^2(\lambda_0, z, z_c), \quad (9)$$

$T(\lambda_0, z, z_c)$  是激光  $z \sim z_c$  段的大气透射率。大气分子密度  $N(z)$  可以从气球探空获得, 或者取大气模式。 $T$  的值可以通过激光雷达接收的纯转动拉曼信号联合瑞利-米氏散射信号计算得到, 首先由弹性散射方程(6)和拉曼散射方程(8)可得气溶胶散射比

(5)式小于 1.0007, 因此误差小于 0.07%。这些结果表明叠加后总信号的气溶胶消光系数可以用激发波长的消光系数来表示, 误差很小。这就可以消除在拉曼激光雷达方程中来回光程消光系数的波长依赖性。正是由于高低阶量子数的正反纯转拉曼信号叠加后信号受温度影响小, 总的消光系数可以用激发波长的消光系数替代这些特点, 因此可以利用纯转动拉曼激光雷达方程结合弹性散射激光雷达方程来有效而准确的求解雷达几何因子。

### 2.3 几何因子的求解方法

根据拉曼激光雷达方程<sup>[3]</sup>, 量子数  $J$  的单谱线纯转动激光雷达方程可表示为

$R(z)$ <sup>[7]</sup>

$$R(z) = R_c \frac{P(z, \lambda_0) P(z_c, \lambda_R)}{P(z, \lambda_R) P(z_c, \lambda_0)}, \quad (10)$$

$R_c$  为  $z_c$  高度处的散射比参考值, 通常在较高高度处选取  $P(\lambda_0, z)/P(\lambda_R, z)$  最小处取  $R_c = 1.02$  (对于  $532 \text{ nm}$ )<sup>[8]</sup>,  $\beta_m(\lambda_0, z)$  为大气分子后向散射系数, 取探空气球或者美国大气模式<sup>[6]</sup>。在几何因子为 1 的区域, 利用纯转动拉曼方程(8)计算气溶胶消光系数<sup>[9]</sup>, 联合上边计算出的  $R$  值拟合出气溶胶消光后向散射比

$$S_a = \frac{\alpha_a}{\beta_a} = \frac{\alpha_a}{(R-1) \cdot \beta_m} \quad (11)$$

通过拟合的  $S_a$  值计算出几何因子重叠区的气溶胶消光系数,然后通过(9)式即可计算激光雷达几何因子。

### 3 模拟计算与分析

根据中纬度美国大气模式<sup>[6]</sup>和转动拉曼激光雷达方程(5)首先计算出单个纯转拉曼谱线的回波信号(模拟中计算了正反各 100 个量子数的信号)。计算时认为激光雷达光学系统透射率、光电转换效率以及发射激光能量为常量。假设了几何重叠因子、三种温度分布模式和三种气溶胶波长指数分布模式。图 2 是假设的几何因子分布图,横坐标是距离地面激光雷达的高度。

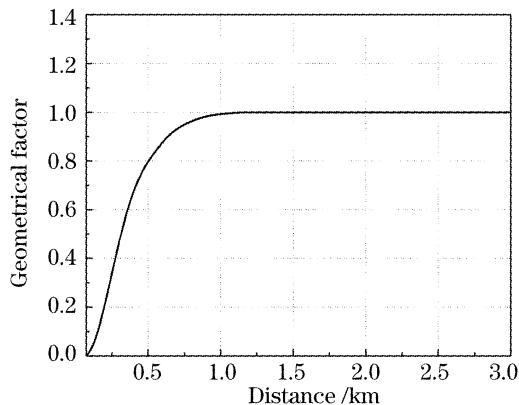


图 2 模拟计算采用的几何因子

Fig. 2 Geometrical form factor in simulation

图 3 表示假设的温度高度分布图,横坐标表示高度,纵坐标是温度值,假设了三种分布模式:第一种是温度分布恒定都为 300 K;第二种是温度 0~0.5 km 为 300 K,0.5 km 以上为 280 K;第三种是温度从 0 km 处 300 K 按照 -10 K/km 均匀变化。

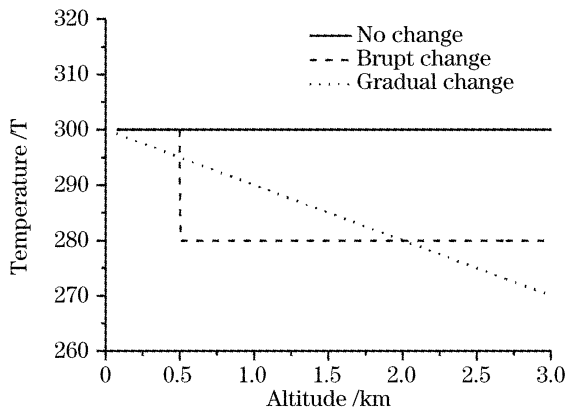


图 3 模拟计算采用的温度分布模式

Fig. 3 Temperature distribution in simulation

图 4 显示了三种气溶胶波长指数分布模式。然后根据光栅光谱仪的谱线通带线型<sup>[10]</sup>(图 5 所示,给出了在斯托克斯  $J=6$  为中心的透射率曲线,同样在斯托克斯  $J=12$ ,反斯托克斯  $J=6$ ,反斯托克斯  $J=12$  也有同样的透射率曲线),计算出单谱线雷达信号计算经光栅滤波叠加后的总的纯转拉曼信号。同样根据米氏-瑞利散射雷达方程(6)、大气模式和假设的几何重叠因子计算出米氏-瑞利散射回波信号。

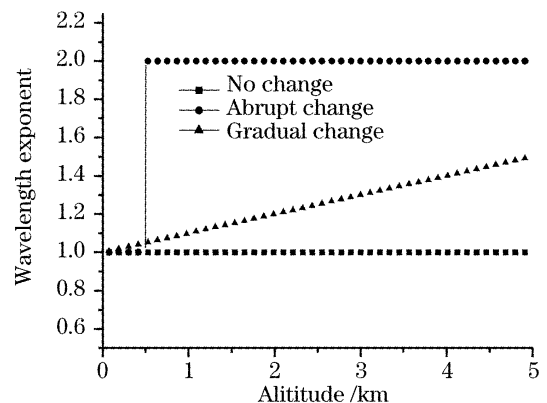


图 4 模拟计算采用的波长指数分布

Fig. 4 Wavelength exponent distribution in simulation

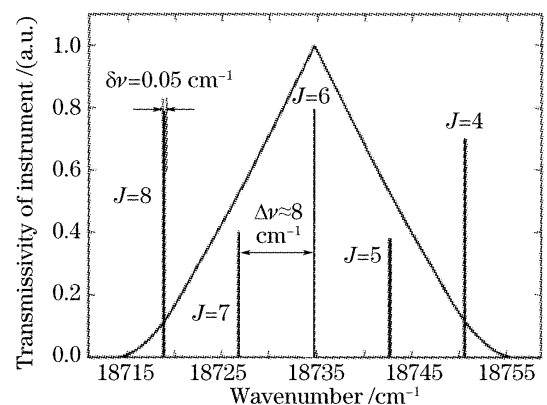


图 5 光栅多色仪在氮气纯转动拉曼信号 S 支处仪器函数  
Fig. 5 Instrumental function of the polychromator tuned to the maximum of the S branch of the pure rotational Raman signal (PPRS) of  $N_2$  molecules

运用本文计算激光雷达几何因子的方法,反演了三种温度分布模式和三种气溶胶波长指数分布模式的激光雷达几何因子。图 6 给出了三种温度分布模式反演的几何因子相对误差[(反演值-假设值)÷假设值]分布图,图 7 给出了三种气溶胶波长指数分布模式反演的几何因子相对误差分布图。结果表明温度和波长指数对反演结果的影响均很小,最大的相对误差小于 0.5%,平均相对误差小于 0.1%。理论模拟结果表明该方法具有很高的精确性。

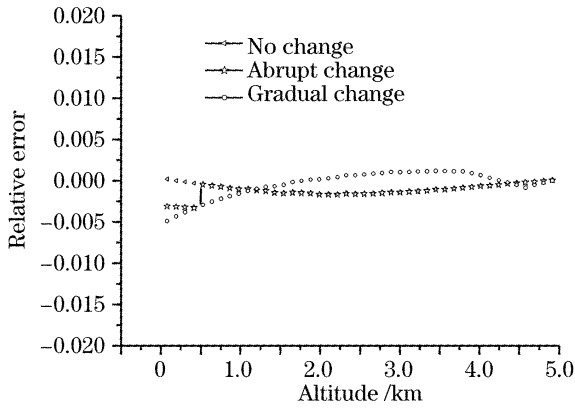


图 6 不同温度模式下的相对误差

Fig. 6 Relative error in different temperature mode

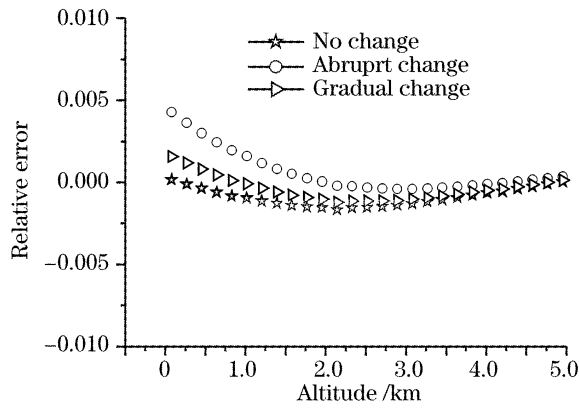


图 7 不同波长指数模式下的相对误差

Fig. 7 Relative error in different wavelength exponent mode

### 4 测量结果

本文提出方法需要纯转动拉曼信号和米氏-瑞利散射信号,关键是获得可靠有效的纯转动拉曼信号。纯转动拉曼信号比弹性散射信号小 5~6 个数量级<sup>[6,9]</sup>,而且纯转动拉曼波长离激发波长很近,一般需要对激发波长有 8 个数量级的截止<sup>[9]</sup>。纯转动拉曼测温也有这样的要求,我们可以利用测温激光雷达<sup>[5,10]</sup>的技术手段获取纯转动拉曼信号来反演几何因子。

建立了一台基于双光栅的纯转动拉曼激光雷达(如图 8),系统发射 532 nm 激光,后向散射光经望远镜接收由双光栅分成两个通道的信号:低量子数正反斯托克斯纯转动拉曼信号  $S_{JL}(z)$  和高量子数的纯转动拉曼信号  $S_{JH}(z)$  对激发波长有 8~10 个数量级的截止<sup>[9]</sup>。光信号经光电倍增管,前置放大器,最后由光子计数器采集信号数据保存在计算机中,把这两个通道的信号叠加  $S_R(z) = S_{JL}(z) + S_{JH}(z)$  后再结合米氏-瑞利散射信号就可以满足测量要求。图 9 显示了激光雷达系统获得在 2007 年 3 月 7 日 19 时获得回波信号:弹性散射信号,低量子数纯转

拉曼信号以及高量子数纯转拉曼信号。图 10 是利用本文方法从图 9 的激光雷达回波信号中反演得到的激光雷达几何因子,几何因子的分布符合本激光雷达系统的结构,表明了该方法的可行性。

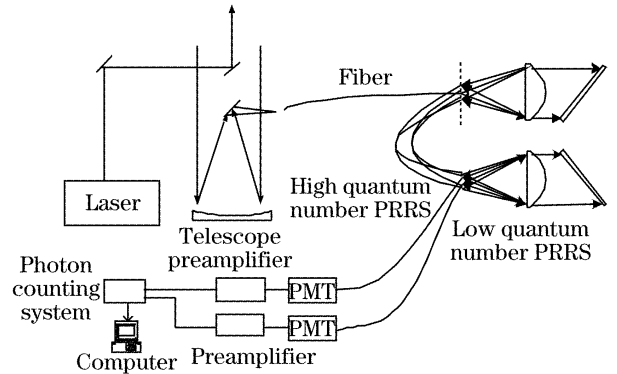


图 8 测量纯转动拉曼信号的实验示意图

Fig. 8 Schematic for pure rotational Raman signal measurement PRRS: pure rotational Raman signal, PMT; photo-multiplier tube

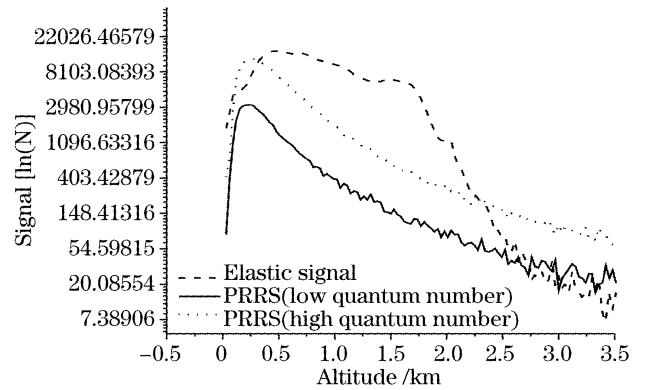


图 9 从纯转动拉曼激光雷达获取的信号

Fig. 9 Lidar return signals acquired by PRRS lidar

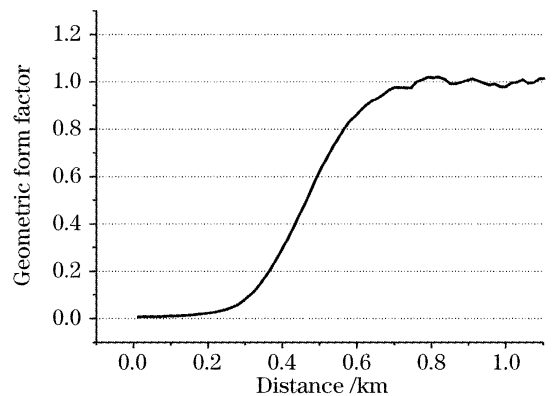


图 10 由纯转动拉曼信号和弹性散射信号计算得到的几何因子

Fig. 10 Geometric form factor determined with PRRS and elastic scattering signals

### 5 结 论

通过叠加高低量子数的纯转拉曼激光雷达回波

信号,可以反演激光雷达几何因子。理论模拟表明:该方法有很高的准确性,反演的最大相对误差小于0.5%。根据激光雷达系统的回波信号反演得到了激光雷达系统的几何因子,证明了本文所提方法的可行性。相比与其他方法,这种新的方法可以在一般天气状况下任意发射角度进行,为激光雷达近距离数据的可靠反演提供了新的手段。

### 参 考 文 献

- 1 Zhang Gaixia, Zhang Yinchao, Hu Shunxing *et al.*. Slant measurements of atmospheric boundary layer aerosol with mobile lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1016~1019 (in Chinese)  
张改霞,张寅超,胡顺星等. 车载测污激光雷达对大气边界层气溶胶的斜程探测[J]. 光学学报, 2004, **24**(8): 1016~1019
- 2 Y. Sasanno, H. Shimizu, N. Takeuchi *et al.*. Geometrical form factor in the laser radar equation; an experimental determination [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(23): 3908~3910
- 3 Sang Whoe Dho, Yong Je Park, Hong Jin Kong. Experimental determination of a geometric form factor in a lidar equation for an inhomogeneous atmosphere[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(24): 6009~6010
- 4 Ulla Wandinger, Albert Ansmann. Experimental determination of the lidar overlap profile with Raman lidar[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(3): 511~514
- 5 D. Kim, S. Park, H. Cha *et al.*. New multi-quantum number rotational Raman lidar for obtaining temperature and aerosol extinction and backscattering scattering coefficient [J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **82**: 1~4
- 6 Liu Yuli, Zhang Yinchao, Su Jia *et al.*. Simulated signal calculation for rotational Raman lidar [J]. *Chin. J. Light Scattering*, 2006, **17**(4): 347~354 (in Chinese)  
刘玉丽,张寅超,苏嘉等. 转动拉曼激光雷达探测大气温度的系统设计及模拟计算[J]. 光散射学报, 2006, **17**(4): 347~354
- 7 D. N. Whiterman, S. H. Melfi, R. A. Fevrare. Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(16): 3068~3082
- 8 Bai Yubo, Shi Guangyu, Koichi Tamura *et al.*. Lidar observations of atmospheric aerosol optical properties over Lhasa [J]. *Chin. Atmospheric Science*, 2002, **24**(4): 559~567 (in Chinese)  
白宇波,石广玉,田村耕一等. 拉萨上空大气气溶胶光学特性的激光雷达探测[J]. 大气科学, 2002, **24**(4): 559~567
- 9 I. Balin, I. Serikov, S. Bobrovnikov *et al.*. Simultaneous measurement of atmospheric temperature, humidity, and aerosol extinction and backscatter coefficient by a combined vibrational-pure-rotational Raman lidar[J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **4**: 1631~1645
- 10 Yuri Arshinov, Sergy Bobrovnikov, Ilja Serikov *et al.*. Temperature profiling in the atmosphere using lidars[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4397**: 453~460