

文章编号: 0253-2239(2010)07-1938-07

振动拉曼散射信号反演激光雷达几何因子分析

赵培涛¹ 李 伟¹ 张寅超² 曹开法³ 胡顺星³

(¹中国气象局气象探测中心, 北京 100081; ²北京理工大学光电学院, 北京 100081)

³中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

摘要 利用研制的探测大气二氧化碳廓线的振动拉曼激光雷达系统采集的氮气分子振动拉曼散射信号, 结合激光雷达探测时的大气消光数据, 反演求出激光雷达的几何因子曲线。并对气溶胶波长指数变化对振动拉曼信号反演几何因子造成的影响进行分析与估算。气溶胶消光波长指数变化对振动拉曼散射信号反演几何因子会带来较大的误差影响。当气溶胶消光波长指数或其谱分布确定时, 振动拉曼散射信号反演几何因子具有简便、可靠等优点, 在振动拉曼激光雷达系统几何因子确定中可以充分应用此方法。

关键词 大气与海洋光学; 激光雷达; 振动拉曼散射; 几何因子

中图分类号 P407.5; TN958.98 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.1938

Determination of Lidar Geometric Form Factor with Vibration Raman Scattering Signals

Zhao Peitao¹ Li Wei¹ Zhang Yinchao² Cao Kaifa³ Hu Shunxing³

¹Meteorological Observation Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

²Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

³Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Combined with the atmosphere extinction data when the lidar was operated, N₂ vibrational Raman scattering signals of detecting atmosphere CO₂ Raman lidar system were used to determine the lidar geometric form factor, and analyze and estimate the influence of aerosol wavelength exponent changes on geometric form factor determination. The results show that the aerosol wavelength exponent would have influenced the determination of geometric form factor with vibrational Raman signals. When the aerosol wavelength exponent was determined by other experiments, determination of geometric form factor for Ramon lidar with vibrational Raman scattering signals is simple, convenient and credible.

Key words atmospheric and ocean optics; lidar; vibrational Raman scattering; geometric form factor

1 引 言

近年来激光雷达作为一种主动探测工具在大气探测领域中得到重要的应用, 能够实现大范围内大气参量、气体污染物的实时遥感测量, 为大气探测提供了一种强有力的探测工具^[1~3]。目前正在进行的国家科技部基础性工作专项重点项目——“我国东部整层大气重要参数高分辨垂直分布探查”中激光雷达作为重要的探测工具得到充分的应用^[4,5], 但

是受到激光雷达本身的结构特点的限制, 激光雷达发射接收系统无论是离轴设计, 还是同轴设计, 都无法避免几何因子的影响, 因此在获取近地面大气参量信息时受到了严格的限制。虽然拉曼散射激光雷达系统通过精密设计后可使参考气体和被探测气体分子两散射通道因子完全吻合, 利用拉曼雷达反演大气参量的方法可以消除雷达系统几何因子的影响, 获得近端大气探测信息, 但是在利用单通道雷达

收稿日期: 2009-08-12; 收到修改稿日期: 2009-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(40905016)和科技部基础性工作专项项目(2007FY110700)资助课题。

作者简介: 赵培涛(1980—)男, 博士, 工程师, 主要从事激光雷达高空大气探测技术方面的研究。

E-mail: peitaozhao@163.com, zhaopt@cma.gov.cn

信号反演大气参量时,会受到几何因子的强烈影响而无法获得近地面的有效数据。例如利用单通道氮气(N_2)拉曼散射信号、米氏散射通道反演大气气溶胶分布时,通常无法获得近端的有效数据,另外在差分吸收激光雷达系统中,由于几何因子的影响,对雷达近端大气污染物的信息很难获取^[6~8]。而近地面的大气信息往往与人类的关系密切,如果得到某一激光雷达的几何因子,或者是有一种比较方便可行的几何因子确定方法,那么在激光雷达数据处理反演中可通过几何因子订正,实现近端大气参量信息的有效获取,因此准确获取激光雷达系统的几何因子曲线一直是雷达设计者、使用者比较关注的问题。

目前对激光雷达几何因子的确定可通过精确地理论计算和实验方法获得。理论计算方法中对激光雷达结构参数、收发视场角等参数精确确定,然后根据激光雷达发射光束在空间传播的特点,对光束发射与接收进行详尽的分析,最终确定出激光雷达系统的几何因子^[9]。而实验方法一般是通过对雷达接收的回波信号进行分析,通过一定的假定条件,由激光雷达方程反演得出几何因子曲线。1979年 Y. Sasano等^[10]提出在水平方向上利用瑞利-米氏散射激光雷达方程反演计算几何因子的方法,这种方法假定在水平方向上大气气溶胶均匀分布,并且需要激光雷达具有扫描功能,能够实现水平测量,在反演过程中气溶胶的不均匀分布会直接影响测量结果。1997年 Sang Whoe Dho等^[11]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,这将给几何因子求解带来一定的误差。2002年 Ulla Wandinger等^[12]提出利用振动拉曼信号结合气溶胶米氏散射信号反演测量几何因子,2005年胡顺星等^[13]利用振动拉曼散射信号和瑞利-米氏散射信号对 L625 激光雷达的几何因子进行了确定,并给出了由于气溶胶雷达比变化引起几何因子的变化关系。2007年曹开法等^[14]利用研制的纯转动拉曼散射信号结合米氏散射信号进行了激光雷达几何因子反演,由于所用纯转动拉曼信号的谱间距间隔非常密集,且纯转动拉曼散射信号波长与入射激发波长非常接近,气溶胶消光波长指数对几何因子反演造成的影响极小,利用纯转动拉曼信号反演几何因子取得了较好的效果。在振动拉曼散射信号反演几何因子过程中,由于振动拉曼波长与激发波长有一频率移动,因此在反演计算过程中要引入气溶胶波长指数,气溶胶波

长指数的变化会对几何因子反演造成一定的影响。本文利用测量大气污染物的振动拉曼散射激光雷达采集的氮气拉曼散射信号进行几何因子反演,并在合肥进行了大气消光模式下对气溶胶波长指数变化引起几何因子反演差别进行了分析与估算,给出了在几何因子过渡区内的相对偏差和标准偏差分布。

2 振动拉曼激光雷达系统

2.1 振动拉曼谱分布

拉曼散射与瑞利散射类似,也是由于分子在照射光照射下产生电磁极化,引起多极子电磁振动而形成的光散射过程。然而拉曼散射与分子内部的振动和转动效应密切相关。散射的频移量与散射分子能级的能量差是一一对应的,与激发波长无关,而分子能级的能量差是不同种类分子的内部固有特征,因此拉曼光谱可用来鉴别大气成分,基于拉曼散射原理研制的激光雷达是具有探测物质种类鉴别能力的遥感工具。

图 1 给出了在 532 nm 激发波长下,水汽(H_2O)、氮气、氧气(O_2)分子的受激拉曼谱线强度示意图。可以看出振动拉曼散射强度比气溶胶的瑞利散射强度小 3~4 个量级,因此其探测能力受到一定的限制,拉曼散射激光雷达一般只适用于浓度较高或距离较近的对象进行探测。根据 Placzek 的极化理论,若照射光为线偏振光,可获得拉曼散射斯托克斯谱线总的后向散射截面与拉曼散射频率的 4 次方成正比,即与拉曼散射波长的 4 次方成反比^[15,16],因此采用较短的入射波长可获得较大的拉曼后向散射截面,从而有利于提高探测灵敏度。中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的用于探测大气成分二氧化碳的拉曼散射激光雷达系统^[17],采用激发光源波长为 354.7 nm,其中氮气分子的拉曼

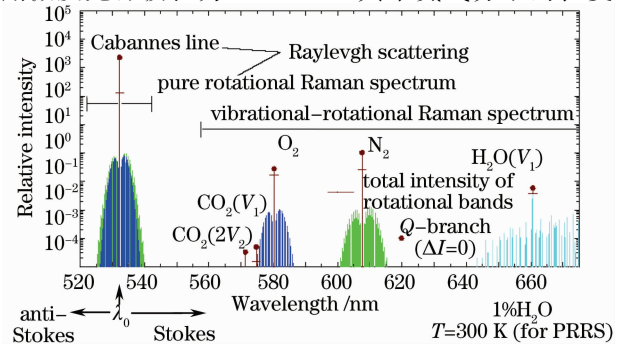


图 1 N_2 , O_2 , H_2O 分子拉曼散射强度

Fig. 1 Relative intensity of N_2 , O_2 , H_2O molecular Raman scattering

散射频移波数为 2330.7 cm^{-1} , 相应的拉曼散射波长为 386.7 nm , 二氧化碳分子拉曼散射频移波数 1285 cm^{-1} , 相应的拉曼散射波长为 371.6 nm 。由于大气中氮气分子含量较高且在对流层高度范围内氮气分子数密度和大气分子数密度比值约为一常数, 因此在振动拉曼激光雷达系统中常常采用氮气分子作为参考气体, 氮气分子回波强度的激光雷达方程可表示为

$$P_{N_2}(z) = C_{N_2} O_{N_2}(z) z^{-2} \beta_{N_2}(z) T_0(z) T_{N_2}(z),$$

$$\beta_{N_2}(z) = \sigma_{n_2}(\pi) n_{N_2}(z), \quad (1)$$

式中 $P_{N_2}(z)$ 为不同高度处氮气分子的振动拉曼散射信号回波强度, C_{N_2} 为激光雷达系统常数, $O_{N_2}(z)$ 为激光雷达系统几何因子, $\beta_{N_2}(z)$ 为氮气分子的振动拉曼散射信号的后向散射系数, 其大小等于后向散射截面 $\sigma_{N_2}(\pi)$ 与分子数密度 $n_{N_2}(z)$ 的乘积, $T_0(z)$ 为激发光在大气中传输时受到的大气衰减项。

$T_0(z) = \exp\left\{-\int_0^z [\alpha_A(\lambda_0) + \alpha_M(\lambda_0)] dz'\right\}$, $T_{N_2}(z)$ 为氮气分子振动拉曼散射信号在大气中传输受到的大气衰减项, $T_{N_2}(z) = \exp\left\{-\int_0^z [\alpha_A(\lambda_{N_2}) + \alpha_M(\lambda_{N_2})] dz'\right\}$, $\alpha_A(\lambda_0)$, $\alpha_M(\lambda_0)$ 为激发波长下气溶胶和大气分子的消光系数, $\alpha_A(\lambda_{N_2})$, $\alpha_M(\lambda_{N_2})$ 为振动拉曼散射波长下气溶胶和大气分子的消光系数。

2.2 振动拉曼激光雷达系统构成

振动拉曼激光雷达系统常用来进行大气微量成分的空间监测, 中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的用于探测大气二氧化碳浓度分布的拉曼激光雷达可实现大气二氧化碳含量的空间监测, 并初步获取了合肥地区上空二氧化碳含量分布及其随季节变化的特征^[15]。

该激光雷达系统结构如图 2 所示, 由激光发射单元、接收光学与后继光学单元、信号探测与采集单元以及控制单元四部分组成。Nd:YAG 激光器发射出的基频光(1064 nm)经过倍频与和频晶体后变成 354.7 nm 的紫外光(其中掺杂着少量 1064 nm 基频光和 532 nm 的倍频光), 光束经过两个镀有 354.7 nm 高反射介质膜的 45°反射镜后进一步滤除掺杂在光束中的基频光和倍频光, 然后经扩束镜进行光束整形, 最后通过 45°全反镜和三维扫描系统发射到大气中。光束经高反镜透射后的光信号可用来作为数据采集卡的同步触发信号。后向拉曼散射信号被望远镜接收, 聚至望远镜焦点处的光纤中, 在光纤的另一端是后继光学装置, 后向散射光信号(包

括瑞利-米氏散射信号、大气分子的拉曼散射信号和天空背景信号等)经过准直镜、窄带滤波片后, 对天空背景信号以及噪声信号进行抑制滤除, 后进入光电倍增管(PMT)进行光电转换, 电信号从光电倍增管输出经放大器进一步放大, 进入光子计数器进行甄别采集。

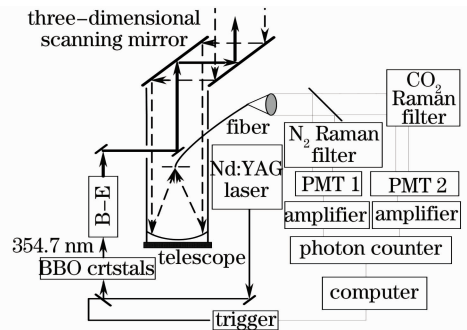


图 2 探测大气二氧化碳廓线的振动拉曼激光雷达系统
Fig. 2 Sketch of vibrational Raman lidar for detecting atmosphere carbon dioxide profile

按照激光雷达方程表示, 雷达回波信号强度与距离的平方成反比, 因此雷达信号随探测距离的增加应呈现迅速递减的趋势, 如图 3 中模拟信号分布所示, 但在实际探测中雷达信号受雷达几何因子影响, 雷达信号强度分布发生变化, 实际分布如图 3 中实验结果所示。该激光雷达采用近牛顿式的望远镜结构, 且为收发同轴系统, 后向散射回波信号在进入望远镜接收系统时会受到望远镜光阑及结构的影响, 造成近端散射回波信号降低, 因此在几何因子的过渡区内, 雷达信号随距离急剧增加, 达到充满区后, 后向散射信号方能完全进入望远镜接收视场, 此时雷达信号随探测距离增加呈现递减趋势。即雷达系统的几何因子对回波信号接收造成影响, 在单通道信号反演大气参量如气溶胶消光系数、浓度分布时必须进行几何因子修正, 方能获得雷达近端探测的有效数据。

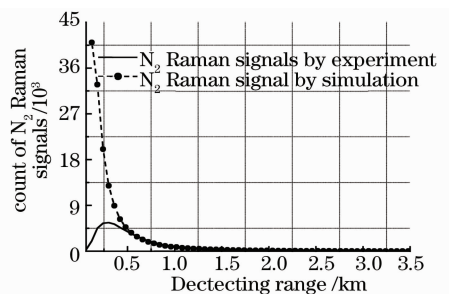


图 3 N₂ 振动拉曼散射回波信号分布
Fig. 3 Distribution of N₂ molecular vibrational Raman scattering echo signals

3 氮气分子振动拉曼散射信号反演几何因子

由振动拉曼散射激光雷达方程可以得出雷达几何因子的表示式：

$$O_{N_2}(z) = \frac{P_{N_2}(z)z^2}{C_{N_2}\beta_{N_2}(z)T_0(z)T_{N_2}(z)},$$

$$\beta_{N_2}(z) = \sigma_{N_2}(\pi)n_{N_2}(z), \quad (2)$$

可以看出振动拉曼散射信号反演几何因子主要受以下几个因素影响：激光雷达系统常数 C_{N_2} ，氮气分子后向散射微分截面 $\sigma_{N_2}(\pi)$ ，氮气分子数密度 $n_{N_2}(z)$ ，激光雷达发射信号和氮气振动拉曼散射信号在大气中的透射率 $T_0(z)$ 和 $T_{N_2}(z)$ ，氮气分子振动拉曼散射信号强度 $P_{N_2}(z)$ 。其中 C_{N_2} 经系统标定后可以确定， $\sigma_{N_2}(\pi)$ 的值可通过实验手段或分子理论计算精确确定，当雷达水平扫描时可假定水平方向上氮气分子数密度均匀分布，在垂直探测或斜程探测时要考虑氮气分子数密度的分布。因此当雷达水平探测时， C_{N_2} ， $\sigma_{N_2}(\pi)$ ， $n_{N_2}(z)$ 三个参量乘积经过归一化处理后不会影响几何因子反演求解。当采用不同大气消光模式时， $T_0(z)$ ， $T_{N_2}(z)$ 值的不同会影响几何因子反演求解，其中气溶胶的消光波长指数的变化会对大气透射率带来较大影响。由于振动拉曼散射波长与激发波长相比有一频率偏移，因此氮气分子振动拉曼散射信号受到气溶胶消光影响应重新考虑，假定气溶胶消光系数随波长变化符合如下关系： $\alpha_A(\lambda) \propto \lambda^{-\gamma}$ ， γ 为气溶胶消光波长指数，通常情况下其数值范围在 0.5~2.0 之间变化。对不同大气消光模式下，气溶胶消光系数在 0.5~2.0 之间变化时对几何因子的求解影响进行分析与估算，并给出在几何因子过渡区内的相对偏差和标准偏差值。

3.1 水平方向振动拉曼散射信号反演几何因子

探测大气二氧化碳浓度分布的振动拉曼散射激光雷达位于安徽省合肥市 (31.9°N, 117.17°E)，通常情况下选择晴朗无云的夜间进行探测。合肥地区气溶胶消光系数数据可由美国中纬度标准大气模式推导得出，同时大气监测激光雷达 (AML)-2 (车载) 偏振米氏激光雷达 (PML) 和拉曼米氏激光雷达 (RML) 在合肥地区开展了长时间的气溶胶探测，并总结出了合肥地区的气溶胶消光系数变化的基本规律，因此该系列激光雷达探测设备测量得到的合肥地区气溶胶消光系数数据也较为可靠，可以用作激光雷达系统几何因子反演，如图 4 所示。由于美国标准大气模式和激光雷达实测气溶胶消光系数都是针对波长为 532 nm 的光波，而所用的探测大气二氧化碳拉曼激光雷达的工作激发波长为 354.7 nm，

因此在考虑大气透射率修正项影响时需进行大气消光系数的波长转换。根据大气分子散射消光理论可知，大气分子的消光系数与散射波长的 4 次方成反比，而气溶胶的消光系数与散射波长的关系受到散射波长指数 γ 的影响，波长指数与气溶胶的大小、种类性质有关，通常情况下介于 0.5~2.0 之间，在数据处理中常常假定为 1.0。水平方向振动拉曼散射信号较垂直方向或斜程探测信号反演几何因子的一个优点是无需考虑氮气分子数密度分布随距离的变化关系，即氮气分子数密度可作为一常数处理，消除了由于大气模式中氮气分子随高度分布的不确定性对几何因子反演带来的误差影响，从这方面来讲，水平方向信号反演几何因子具有更高的准确性。

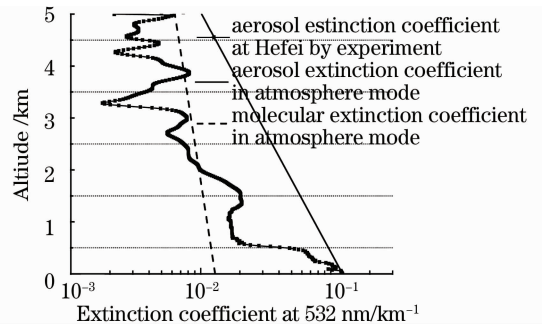


图 4 气溶胶消光系数廓线

Fig. 4 Aerosol extinction coefficient profile

图 5 是利用水平方向振动拉曼信号反演几何因子曲线分布的结果，其中所用的大气模式为实测近地面气溶胶消光数据及美国标准大气模式中的大气分子消光数据，气溶胶消光波长指数分别取 0.5, 1.0, 1.5, 2.0。可以看出在同一大气模式下，气溶胶消光系数波长指数的变化对几何因子反演带来较大影响，其中波长指数取为 0.5 和 2.0 时利用振动拉曼信号反演的激光雷达几何因子可信度较差，两几何因子曲线饱和区部分分别呈现下降和上升趋势，这与激光雷达几何因子分布特点不相吻合，而波长指数取 1.0 和 1.5 时利用同一大气模式反演的几何因子廓线分布与理论模拟结果吻合较好。Wu Yonghua 等^[18]利用双波长激光雷达对合肥地区的气溶胶消光波长指数值进行了测量，得出无沙尘出现的天气情况下，合肥地区 1.0~8.5 km 高度范围内气溶胶消光波长指数基本在 1.0~2.0 之间分布，平均值为 1.3^[16]。振动拉曼散射信号反演几何因子的结果同时证明了合肥地区气溶胶消光波长指数在 1.0~1.5 之间分布的合理性。

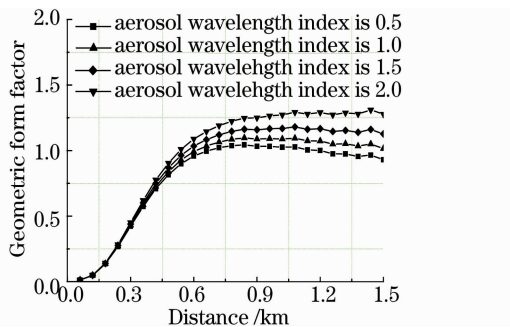


图 5 水平振动拉曼散射信号反演几何因子结果

Fig. 5 Geometric form factors of lidar retrieved by vibrational Raman scattering signals in horizontal direction

3.2 气溶胶波长指数对几何因子反演的影响

气溶胶波长指数取 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 时反演的几何因子与其均值相对差别如图 6 所示, 可以看出 4 条相对误差曲线随距离增加均呈线性增加, 在几何因子求解过程中比较关注的是过渡区几何因子的变化规律, 在饱和区以后几何因子的数据经归一化后可设定为 1。其中气溶胶波长指数为 1.5 时, 反演的几何因子数值在 0.7 km 左右与均值的相对误差小于 1%。气溶胶波长指数取 1.0 时, 在几何因子饱和区前端 0.7 km 处的相对差别小于 3%。气溶胶波长指数为 0.5 和 2.0 时, 反演的几何因子数值在 0.7 km 左右与均值的相对误差较大, 可达到 8%。图 7 给出了 4 条几何因子曲线的均值及标准偏差, 可以看出随着探测距离的增加, 标准偏差也随之增大, 在过渡区范围内标准偏差介于 0~0.06 之间分布。

不同地区气溶胶消光波长指数因气溶胶大小、性质等有所不同会有所差异, 一般情况下其值大小

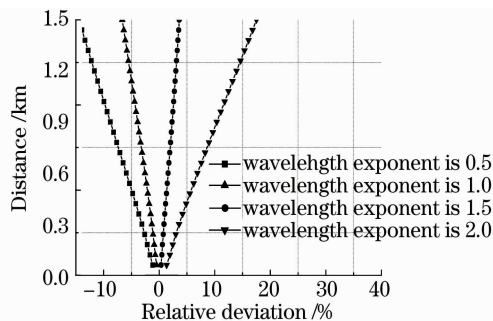


图 6 不同波长指数反演几何因子与其均值的相对偏差

Fig. 6 Relative deviation between geometric factor and its mean of four curves retrieved by different wavelength exponents

介于 0.5~2.0 之间。如图 7(a) 中所示, 根据合肥地区大气消光模式, 将气溶胶消光波长指数分别取 0.5, 1.0, 1.5 和 2.0 后, 利用振动拉曼散射信号反演得到四条几何因子曲线的均值曲线(标记为 1)。结合 Wu Yonghua 等^[18]利用双波长激光雷达对合肥地区气溶胶波长指数的探测结果可知, 合肥地区的气溶胶波长指数均值在 1.3 左右, 因此将振动拉曼散射信号反演得到波长指数为 1.3 情况下的几何因子曲线(标记为 2), 如图 7(b) 所示。几何因子曲线 1 和 2 之间的相对误差如图 8 所示, 可以看出在过渡区范围内二者的相对偏差小于 0.3%。由于该振动拉曼激光雷达的望远镜系统采用发射和接收同轴设计结构, 几何因子过渡区较小, 一般情况下在 0.7 km 左右, 由对比结果来看, 在合肥地区大气消光模式下, 采用均值反演求解的几何因子曲线结果与实际气溶胶波长指数($\gamma=1.3$)反演得到的结果相差极小, 求解的均值结果可以作为激光雷达几何因子的最终结果。

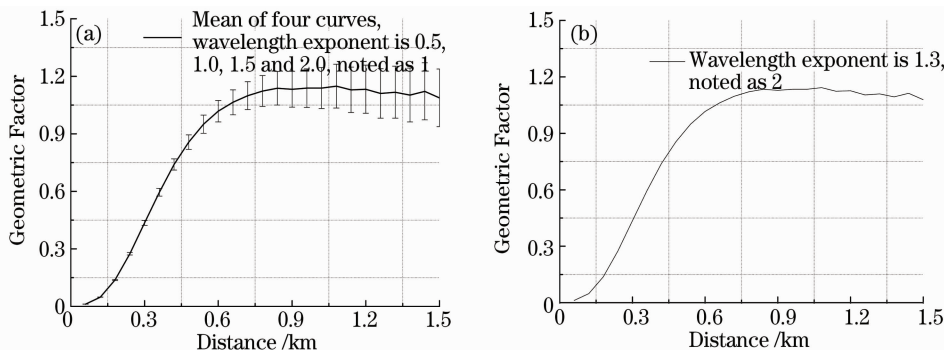


图 7 几何因子均值曲线及标准偏差分布(a), 波长指数 1.3 反演得到几何因子曲线(b)

Fig. 7 Mean values of geometric form factors and its standard deviation distribution, noted as 1(a), geometric form factors factors derived with wavelength exponent 1.3, noted as 2(b)

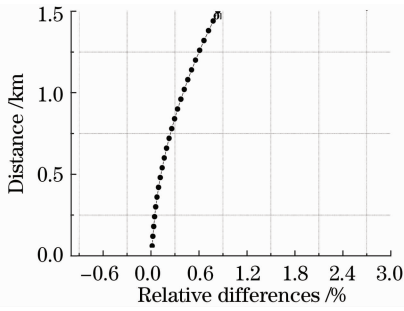


图 8 水平方向上两几何因子曲线相对差别

Fig. 8 Relative differences of two geometric form factor profiles in horizontal

3.3 垂直方向振动拉曼散射信号反演几何因子曲线

激光雷达作为大气参量遥感的重要工具,常常进行垂直方向的高空探测,以获得近地面至高空范围内气溶胶浓度、大气污染物、大气成分廓线等信息,从而获得了较为丰富的垂直方向上振动拉曼信号,同理为准确有效获得激光雷达近端大气参量信息,须对激光雷达探测的原始回波信号进行几何因子订正,因此利用垂直方向上的振动拉曼散射信号进行几何因子反演工作具有重要实践意义。

由几何因子反演方程可知,在垂直方向上反演几何因子需要考虑大气分子数密度随高度的分布,该数据可由经验大气模式或无线电探空系统获得。大气分子的分子数密度的经验公式为 $N_0(z) = N_0(0)\exp(-z/z_r)$, 其中 z_r 为参考高度,一般取 8 km, $N_0(0) = 2.54697 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。由于垂直方向高空大气分子数密度的不确定性,会导致垂直方向振动拉曼散射信号几何因子反演结果比水平方向反演结果误差要大一些。图 9 给出了利用垂直方向上振动拉曼散射信号反演几何因子曲线结果,反演过程中利用合肥地区大气消光数据,同时考虑了气溶胶波长指数的变化对反演结果的影响,给出了几何

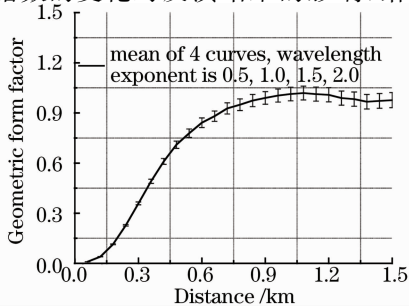


图 9 不同波长指数反演的几何因子曲线均值及标准偏差

Fig. 9 Mean value of geometric form factors retrieved by different wavelength exponents and its standard deviation

因子曲线均值及标准偏差,可以看出在几何因子过渡区内,由于气溶胶消光波长指数的变化,引起几何因子变化的标准偏差小于 0.03。图 10 给出了合肥地区大气消光模式下,气溶胶消光波长指数为 1.3 时反演得到的几何因子曲线与图 9 中均值几何因子曲线的差别,可以看出在几何因子过渡区内二者偏差小于 0.1%。

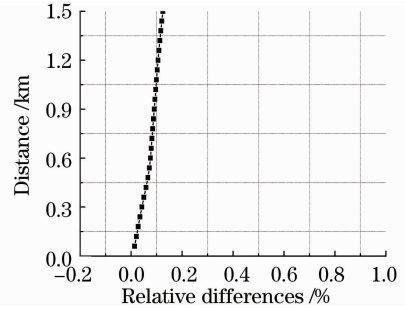


图 10 垂直方向上两几何因子曲线相对误差

Fig. 10 Relative differences of two geometric form factor profiles in vertical direction

4 结 论

利用振动拉曼散射信号,结合合肥地区大气消光数据,对气溶胶波长指数变化引起几何因子的改变进行了模拟计算,气溶胶波长指数取 0.5 和 2.0 两个极值时,过渡区内几何因子将会引起 8% 的变化。气溶胶波长指数为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 时,利用水平方向测量得到的振动拉曼信号可求解得到相应的 4 条几何因子曲线,在过渡区内的标准偏差为 0.06,利用垂直方向振动拉曼散射信号反演得到的 4 条几何因子曲线在过渡区内的标准偏差为 0.03。合肥地区的气溶胶波长指数均值在 1.3 左右分布,利用该值求解反演了水平和垂直方向激光雷达的几何因子曲线,并分别与波长指数为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 反演得到的 4 条几何因子的均值进行比较,过渡区内二者在水平方向的相对偏差小于 0.3% (水平) 和 0.1% (垂直),可以看出利用振动拉曼散射信号反演激光雷达几何因子具有一定的可行性,其中气溶胶消光波长指数的变化对几何因子反演会带来一定的影响。如果某一地区的气溶胶消光波长指数能通过其他探测手段获知,则利用振动拉曼散射信号反演激光雷达几何因子具有较强的可行性和准确性。如果某一地区的气溶胶消光波长指数在某一范围内分布时,可以按照气溶胶消光波长指数的谱分布模式进行相应的取值,得到一系列几何因子曲线,然后根据消光波长指数谱分布模式对几何因子进行加权

求解,可以得到激光雷达系统的几何因子。

参 考 文 献

- 1 F. G. Fernald. Analysis of atmospheric lidar observations; some comments [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652~653
- 2 D. N. Whiteman, S. H. Melfi, R. A. Ferrare. Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(16): 3068~3082
- 3 Zhao Peitao, Zhang Yinchao, Wang Lian *et al.*. Capability of Raman lidar for monitoring the variation of atmospheric CO₂ profile [J]. *Chin. Phys. B.*, 2008, **17**(1): 335~342
- 4 Wang Min, Hu Shunxing, Fang Xin *et al.*. Variation characteristics of water vapor mixing ratio profile over Hefei [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(s): 156~161
王 敏, 胡顺星, 方 欣等. 合肥上空水汽时空变化特征的研究 [J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(s): 156~161
- 5 Wang Min, Hu Shunxing, Fang Xin *et al.*. Precise correction for the troposphere target location error based on lidar [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(7): 5091~5097
王 敏, 胡顺星, 方 欣等. 激光雷达精确修正对流层目标定位误差 [J]. *物理学报*, 2009, **58**(7): 5091~5097
- 6 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
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
- 7 Hu Shunxing, Hu Huanling, Wu Yonghua *et al.*. L625 differential absorption lidar system for tropospheric ozone measurements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 597~601
胡顺星, 胡欢陵, 吴永华等. L625 差分吸收激光雷达探测对流层臭氧 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 597~601
- 8 Zhang Yinchao, Hu Huanling, Tan Kun *et al.*. Development of a mobile lidar system for air pollution monitoring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1025~1031
张寅超, 胡欢陵, 谭 锟等. AML-1 车载式大气污染监测激光雷达样机研制 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1025~1031
- 9 Wang Shaolin, Cao Kaifa, Hu Shunxing *et al.*. Analysis and determination of lidar geometrical factor [J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(2): 147~150
汪少林, 曹开法, 胡顺星等. 对激光雷达几何因子的分析与测量 [J]. *激光技术*, 2008, **32**(2): 147~150
- 10 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
- 11 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
- 12 Ulla Wandinger, Albert Ansmann. Experimental determination of the lidar overlap profile with Raman lidar [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(3): 511~514
- 13 Shunxing Hu, Xiaobin Wang, Yonghua Wu *et al.*. Geometrical form factor determination with Raman backscattering signals [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(14): 1879~1881
- 14 Cao Kaifa, Du Xiaoyong, Wang Shaolin *et al.*. Determination of lidar geometric form factor with pure rotational raman scattering signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1349~1354
曹开法, 杜小勇, 汪少林等. 纯转动拉曼法确定激光雷达几何因子 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1349~1354
- 15 Vanessa Sherlock, Anne Garnier, Alain Hauchecorne *et al.*. Implementation and validation of a Raman lidar measurement of middle and upper tropospheric water vapor [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(27): 5838~5850
- 16 ChiaoYao She. Spectral structure of laser light scattering revisited: bandwidths of nonresonant scattering lidars [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(27): 4875~4884
- 17 Zhao Peitao, Zhang Yinchao, Wang Lian *et al.*. Measurement of tropospheric CO₂ and aerosol extinction profile with Raman lidar [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(3): 157~160
- 18 Wu Yonghua, Applied Lidar to detecting atmosphere temperature and aerosol [D]. *Doctor Dissertation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics of CAS*, 2002, 62~80