

文章编号:1004-4213(2010)07-1340-5

# Raman 激光雷达探测气溶胶光学特性\*

张金业<sup>1,2</sup>, 龚威<sup>1</sup>, 黄楚云<sup>2</sup>, 李俊<sup>1</sup>

(1 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

(2 湖北工业大学 理学院, 武汉 430068)

**摘 要:**介绍了武汉大学自行研制的 Raman 多通道激光雷达系统,给出了整个系统的设计原理及主要技术参量.详细描述了利用 Raman 激光雷达原理反演大气气溶胶消光系数、后向散射系数和激光雷达比等光学特性的方法,并对求解消光系数过程中的关键部分做了讨论分析.同时对武汉上空对流层低空大气气溶胶、云以及边界层等光学特性进行了实时探测反演.实验结果表明:该 Raman 多通道激光雷达系统在夜晚对低空气溶胶的垂直分布特性具有较好的探测能力,工作性能可靠.

**关键词:**喇曼激光雷达;气溶胶;消光系数;后向散射系数;激光雷达比

**中图分类号:** TP722.4

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20103907.1340

## 0 引言

气溶胶是悬浮在大气中的直径为  $0.001 \sim 100 \mu\text{m}$  的固体和(或)液体微粒与气体载体共同组成的多相体系<sup>[1]</sup>,在降水、辐射及大气的光电特性等大气物理过程中起着重要的作用,直接影响着人们的健康和生存环境,特别是影响到天气和气候的变化.激光雷达作为一种主动式的遥感方式,已经在气溶胶的探测领域发挥越来越重要的作用.特别是在欧洲,已经建立了一个激光雷达网<sup>[2]</sup>,在很多地方分布了激光雷达站,来探测大范围的气溶胶特性.亚洲也在积极开展激光雷达探测大气特性等方面的研究.目前中国国内的激光雷达站点主要有合肥、兰州、北京、西安、苏州、青岛、武汉等城市. Mie 散射激光雷达和 Raman 散射激光雷达都可以对气溶胶光学特性进行探测,但利用 Mie 散射激光雷达数据反演气溶胶光学特性,需要先假定激光雷达比的值,而激光雷达比取决于气溶胶的化学成分、颗粒的大小以及大气折射率等,是随时间和空间而变化的.因此不适当的假设会给反演结果带来较大误差.利用 Raman 激光雷达探测气溶胶的光学特性,不需要作此假设,因此在数据反演准确度方面具有较大的优势.而国内很多站点都是基于 Mie 散射激光雷达来

探测气溶胶的光学特性.安徽光机所研究人员报道了利用 Raman 激光雷达探测合肥地区气溶胶波长指数等<sup>[3]</sup>.德国莱比锡大学教授 Matthias Tesche 和 Albert Ansmann 等<sup>[4]</sup>,在 2004 年 10 月及 2005 年 1 月利用 Raman 激光雷达分别在中国珠江三角洲和北京地区进行了气溶胶光学特性的探测实验,并取得了很好的效果.本文介绍了武汉大学自行研制 Raman 多通道激光雷达系统,探测和反演了武汉上空气溶胶的消光系数、后向散射系数和激光雷达比的垂直分布,并对云及边界层等有较好的探测能力.

## 1 Raman 激光雷达系统

Raman 激光雷达系统总体上可以分为三个部分,激光发射单元、回波信号接收单元和信号采集及控制单元.图 1 是实物图,图 2 是整个系统的原理

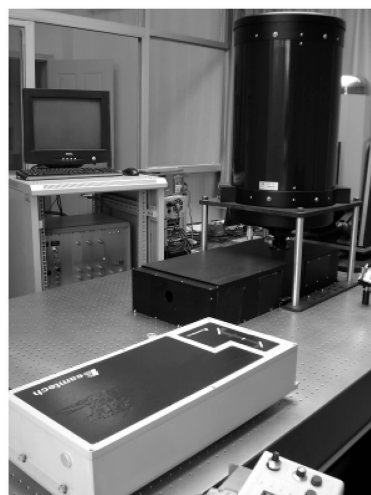


图 1 Raman 激光雷达系统  
Fig. 1 Raman lidar system

\*国家重点基础研究发展计划(2009CB723905、2006CB403701)、国家高技术研究发展计划(2009AA12Z107)和国家自然科学基金(40871171)资助  
Tel:029-88204271 Email:yezi.zh@163.com  
收稿日期:2009-09-16 修回日期:2009-12-07

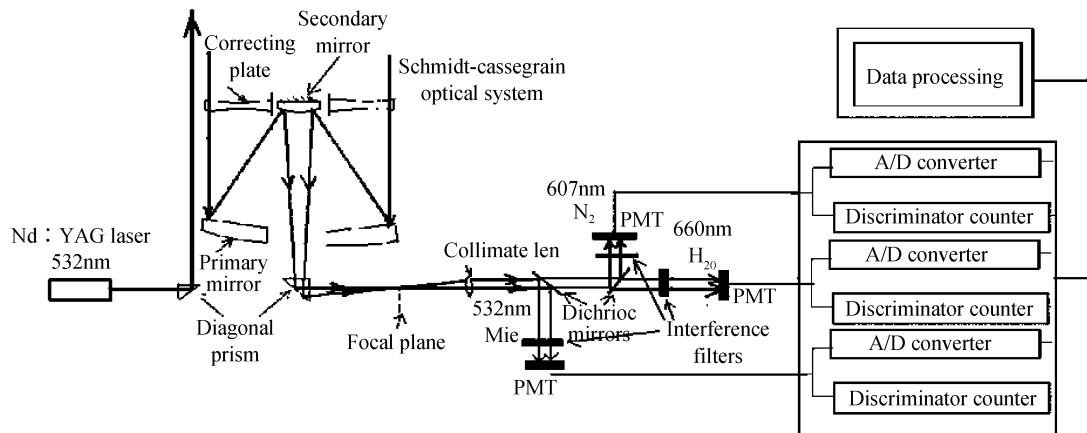


图 2 Raman 激光雷达结构原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the Raman lidar system

图. 该系统的发射单元是 Nd : YAG 激光器, 中心波长为 532 nm. 回波信号接收单元是斯密特-卡赛格林式光学望远镜接收系统. 信号采集单元是集成了模数转换和光子计数两种方式同时探测信号, 采集速率是 20 MHz.

信号接收光路中使用的光电探测器是 R7400 型光电倍增管 (PMT). 米散射通道型 PMT 探测

表 1 Raman 激光雷达系统主要技术参量

Table 1 The main specifications of Raman

Parameter	Value
1 LASER	
Wavelength	607 nm
Energy	200 mJ
Mode	quasi TEM00
Pulse	~10 ns
Stability	<=5%
Frequency	10Hz
2 TELESCOPE	
Type	Schmidt Cassegrain
Optical Diameter	356 mm
Focal Length	3 556 mm
3 INTERFERENCE FILTER	
Mie channel	
CWL	532 nm
FWHM	5.0±1 nm
Min. T	50%
Lamy scattering channel	
CWL	532 nm
FWHM	3±0.5 nm
Min. T	50%
4 PMT	R7400
5 LICEL DATA ACQUISITION	
Analog acquisition	12 Bit ,20 MHz
Photon counting	250 MHz

波长范围是 300 ~ 800 nm, 峰值灵敏度波长为 500 nm, 用来接收 532 nm 米散射信号. 喇曼散射通道型 PMT 探测波长范围是 300~900 nm, 峰值灵敏度波长为 630 nm, 用来探测 607 nm 氮气的喇曼散射信号. 整个系统的主要技术参量如表 1.

系统通过接收 532 nm 后向散射信号和 607 nm N<sub>2</sub> 喇曼后向散射信号, 可反演气溶胶的消光系数、后向散射系数及激光雷达比等光学特性. 本系统在设计中还有 660 nm H<sub>2</sub>O 喇曼散射信号. 可以反演水汽的垂直分布.

Raman 散射信号很弱, 是 Mie 散射信号的千分之一, 所以必须对噪音进行很好的抑制, 才能保证 Raman 信号的有效接收. 噪音可以分为光噪音和电子学噪音. 若 Raman 通道中混入千分之一的 Mie 散射信号, 就可能把喇曼散射信号淹没, 所以在喇曼通道中采用高质量的滤光片对 Mie 信号和其他背景光进行抑制. 电子学噪音主要是电磁干扰, 本文对工作环境进行电磁测试, 对各种光电转换器件采取了屏蔽措施, 并使光发射系统的地线进行了分离. 对电磁环境进行测量, 确定噪音来源和贡献量的大小, 将参量送入反演模型, 进行软件消除.

## 2 数据反演方法

Raman 散射是一种非弹性散射, 入射光与大气分子相互作用, 交换能量, 从而引起频率发生变化<sup>[5]</sup>. 交换能量的多少严格由分子内部固有能级特性决定, 即散射光相对于入射光的频移量是由发生 Raman 散射的分子种类决定的. 氮气分子在大气中的混合比稳定, 本文利用氮气的 Raman 散射信号反演气溶胶的消光系数, 同时, 结合 Mie 散射信号反演气溶胶的后向散射系数和激光雷达比.

## 2.1 消光系数

由 Raman 激光雷达测量原理可得气溶胶对激光发射波长  $\lambda_L$  的消光系数为<sup>[6]</sup>

$$\alpha_{\text{aer}}(\lambda_L, z) = \left\{ \frac{d}{dr} \left[ \ln \frac{n_N(z)}{z^2 P(\lambda_N, z)} \right] - \alpha_{\text{mol}}(\lambda_L, z) - \alpha_{\text{mol}}(\lambda_N, z) \right\} / \left[ 1 + \frac{\lambda_L}{\lambda_N} \right] \quad (1)$$

式中,  $P(\lambda_N, z)$  是喇曼后向散射回波信号,  $\alpha_{\text{mol}}(\lambda_L, z)$  和  $\alpha_{\text{mol}}(\lambda_N, z)$  分别是大气分子对激光发射波长  $\lambda_L$ , 氮气产生 Raman 散射后的波长  $\lambda_N$  的消光系数, 可以利用瑞利散射模型得到,  $n_N(z)$  是氮气的分子数密度, 可以利用已有的大气模型或者相应的探空仪测得. 本文使用标准大气模型来计算大气分子对激光的消光系数. 大气的空间状态很复杂, 而大气温度、压力、密度等常量随高度的分布状况, 又是气象、航空航天和空间科学研究中必不可少的资料. 因此, 人们根据大量探测数据和理论, 规定了一种特性随高度平均分布的最接近实际大气的大气模型, 被称为“标准大气”, 它是得到国际上承认的假定的大气温度、压力和密度的垂直分布, 目前应用较为广泛的是美国 1976 年的标准大气模型. 对于标准大气模型, 高度  $z$  上的大气密度为

$$\rho(z) = \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{z}{H}\right) \quad (2)$$

式中  $H = 8.3 \text{ km}$ ,  $\rho_0 = 2.5 \times 10^{19} \cdot \text{cm}^{-3}$  为海平面上标准大气密度. 所以  $n_N(z) = 78\% \rho(z)$ .

则根据美国标准大气分子模式可得到瑞利散射后向散射系数与消光系数

$$\beta_{\text{mol}}(\lambda, z) = 5.45 \left( \frac{550 \text{ nm}}{\lambda} \right)^4 \cdot 10^{-28} \cdot \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{z}{H}\right) \quad (3)$$

$$\alpha_{\text{mol}}(\lambda, z) = \frac{8\pi}{3} \cdot 5.45 \left( \frac{550 \text{ nm}}{\lambda} \right)^4 \cdot 10^{-28} \cdot \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{z}{H}\right) \quad (4)$$

在式(1)中, 氮气分子密度与距离校正信号比对数按高度  $r$  的斜率是关键.

对于脉冲回波信号  $P(z, \lambda_N, \lambda_L)$ , 这个对数是个离散值, 所以必须对  $\ln[n_N(z)/z^2 P(z, \lambda_N, \lambda_L)]$  线性拟合. 一般情况下采用一元线性加权最小二乘法, 令

$$y = \ln \frac{n_N(z)}{z^2 P(z, \lambda_N, \lambda_L)} \quad (5)$$

$$f = a + bz \quad (6)$$

使加权最小二乘的离差平方和

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \omega_i [y_i - f(z_i, a, b)]^2 \quad (7)$$

最小, 即  $d\chi^2/da = 0$ ,  $d\chi^2/db = 0$  就得到回归参数  $a$ ,

$b$ ,  $b$  就是式(1)所要求的斜率值. 式(7)中的  $\omega_i$  是权值, 等于  $\omega_i = 1/\sigma_i^2$ ,  $\sigma_i^2$  是测量误差. 对于回波信号的误差, 要根据具体情况来定. 光电探测器以光子计数方式探测光信号, 在阳极出射的电子信号服从泊松分布<sup>[7]</sup>. 根据泊松分布的性质可得

$$\sigma_{P(z, \lambda_N, \lambda_L)}^2 = E(P(z, \lambda_N, \lambda_L)) \approx \overline{P(z, \lambda_N, \lambda_L)},$$

即利用回波信号的均值来代替期望值.

## 2.2 后向散射系数及激光雷达比

结合 Mie 散射后向散射信号, 可得气溶胶对激光出射波长  $\lambda_L$  的后向散射系数  $\beta_{\text{aer}}(\lambda_L, z)$  为

$$\beta_{\text{aer}}(\lambda_L, z) = -\beta_{\text{mol}}(\lambda_L, z) + (\beta_{\text{aer}}(\lambda_L, z_0) + \beta_{\text{mol}}(\lambda_L, z_0)) \cdot \frac{P(\lambda_L, z) \cdot P(\lambda_N, z_0) \cdot n_N(z)}{P(\lambda_L, z_0) \cdot P(\lambda_N, z) \cdot n_N(z_0)} \cdot \frac{\exp\left(-\int_{r_0}^z \alpha_{\text{aer}}(\lambda_N, z) + \alpha_{\text{mol}}(\lambda_N, z) dz\right)}{\exp\left(-\int_{r_0}^z \alpha_{\text{aer}}(\lambda_L, z) + \alpha_{\text{mol}}(\lambda_L, z) dz\right)} \quad (8)$$

式中,  $P(\lambda_L, z)$  是米散射后向散射信号. 为了计算此式, 必须找一个参考点  $z_0$ , 在  $z_0$  处气溶胶的后向散射系数远小于大气分子的后向散射系数, 即  $(\beta_{\text{aer}}(\lambda_L, z_0) + \beta_{\text{mol}}(\lambda_L, z_0)) \approx \beta_{\text{mol}}(\lambda_L, z_0)$ . 一般情况下 (5 km 以上), 大气中气溶胶的含量就会很少. 本文中参考点  $z_0$  选在 6 km 处.

气溶胶的消光后向散射比, 也称为激光雷达比

$$s_1(\lambda, z) = \frac{\alpha_{\text{aer}}(\lambda, z)}{\beta_{\text{aer}}(\lambda, z)} \quad (9)$$

气溶胶的消光后向散射比  $S_1$  依赖于发射的激光波长、气溶胶粒子特性等, 不是一个常量.

而对于大气分子来说, 其后向散射系数  $\beta_{\text{mol}}(\lambda, z)$  与消光系数  $\alpha_{\text{mol}}(\lambda, z)$  之间的关系严格满足下面的关系

$$s_2 = \frac{\alpha_{\text{mol}}(\lambda, z)}{\beta_{\text{mol}}(\lambda, z)} = \frac{8}{3} \pi \quad (10)$$

因此, 式(8)中的  $\beta_{\text{mol}}(\lambda, z)$  同样可以通过大气分子瑞利散射模型得到.  $\alpha_{\text{aer}}(\lambda_L, z)$  和  $\alpha_{\text{aer}}(\lambda_N, z)$  可以由氮气 Raman 散射信号反演得到.

## 3 气溶胶光学特性参量的探测及结果分析

图 3 给出了 2009 年 5 月 9 日凌晨 2 点 59 分 (实线)、3 点 59 分 (点划线) 和 4 点 59 分 (星线) 在武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室顶楼 (30°32'N, 114°21'E) 探测上空气溶胶光学特性的结果. 图 3(a)~(c) 分别为气溶胶对激光发射波长 532 nm 的消光系数、后向散射系数和激光雷达比的垂直分布廓线. 这里给出了 0.5~2.5 km 范围内探测结果, 在 0.5 km 以下, 受到激光雷达系统几何重

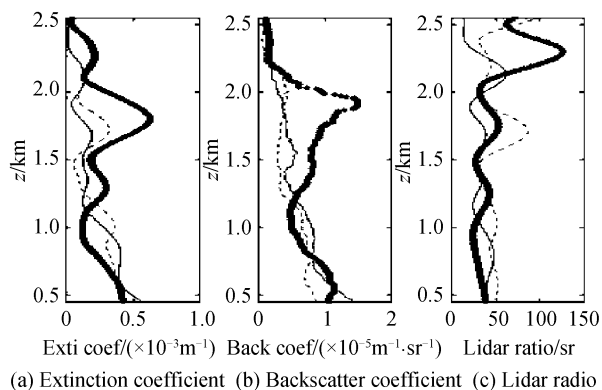


图 3 2009 年 5 月 9 日凌晨 2 点 59 分、3 点 59 分、4 点 59 分, Raman 激光雷达探测气溶胶消光系数、后向散射系数和激光雷达比垂直廓线分布图

Fig. 3 Profiles of aerosol extinction coefficient, backscatter coefficient and lidar ratio at 532 nm at local time 02:59, 03:59, 04:59 on May 9, 2009

叠因子影响. 其中每条廓线的积分时间是 30 min, 垂直分辨率是 7.5 m, 并对 150 m 的原始信号做平滑处理.

由图可以看出, 三个时间点的消光系数、后向散射系数和激光雷达比的变化趋势. 明显在 04:59 时, 不到 2 km 处出现了云, 相应的消光系数和后向散射系数达到最大值, 但是本文发现在消光系数、后向散射系数达到最大值时, 激光雷达比没有在相同的位置也出现最大值, 而是在相对较高的位置处出现了一个峰值. 在 1.8 km 处, 消光系数达到最大值, 而在 2.3 km 处, 激光雷达比达到一个峰值. 这种现象在 Wu Yonghua<sup>[8]</sup> 及 Albert Ansmann<sup>[9]</sup> 等在研究云光学特性论文中也有报道. 出现这种情况的原因可能与构成云的气溶胶颗粒的大小、成分以及方向有关, 但有待于深入研究. 图 3(a)~(c) 显示了每隔一个小时, 气溶胶光学特性随高度的分布是有较快的变化的, 这主要是因为 2009 年 5 月 9 日, 武汉市受到高空低槽东移的暖湿西南气流和中低层切变线影响, 大气气团运动相对较快. 图 4 给出根据

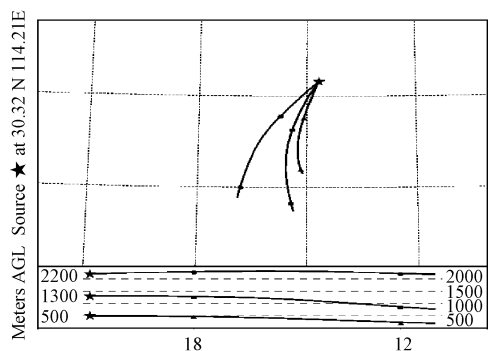


图 4 2009 年 5 月 9 日 05 时十小时大气气团运动的逆向轨迹

Fig. 4 Ten hour backward trajectories ending at Wuhan (30°32'N, 114°21'E) at 500 m, 1300 m and 2200 m height at 05:00 on May 9, 2009

美国国家海洋和大气局 (NOAA) 后向轨迹模式 (HYSPPLIT) 得到的大气气团运动的轨迹. 图中 UTC 是通用协调时 (Universal Time Coordinated), 北京时区领先 UTC 8 h. 图中绘制了 5 月 9 日 05 时前 10 h 实验地点上空气团运动的逆向轨迹情况. 图中显示了气团是从西南方向运动过来的. 另外, 从湖北省气象与生态自动监测网风力分布图可以清楚地显示在 9 日 04 时左右, 武汉地区西南风, 风速大约在 5 m/s 左右. 因此, 在这个时间段内所测的气溶胶变化较快与具体的天气情况相吻合.

图 5 给出了 2009 年 10 月 22 日晚在 19:20 到 23:20 之间气溶胶激光雷达比的变化情况. 从图中可以看出激光雷达比的值大部分分布在 20~60. 这与 2004 年 10 月 Matthias Tesche 和 Albert Ansmann 等在中国珠江三角洲等地测的值基本一致. 武汉及珠江三角洲地区都是工业城区, 人口密集, 气溶胶浓度以及颗粒都相对比较大, 所以激光雷达比的值相对于欧洲等城市的要偏小. 比较图 3 和图 5 可以看出, 十月份的激光雷达比要比五月份的值偏小. 今年武汉九、十月天气降水很少, 空气中浮尘、灰尘较多, 高空气流平直, 逆温层厚, 不利用污染物的扩散. 所以气溶胶含量及颗粒较大. 图 6 为 2009 年 10 月 13 日夜间 7 点到 14 日凌晨 2 点用喇曼激光雷达探测反演的气溶胶消光系数. 可以看出在 1.3 km 以下有非常稳定的边界层存在, 消光系数较大. 同时可以发现在 1.5 km 到 3 km 之间的大气中悬浮着大量的气溶胶团. 十月上旬, 在国家环保部网站公布数据显示, 武汉在全国 86 个受监控的重点城市中, 空气质量级别为 III 2, 污染程度最高, 属于

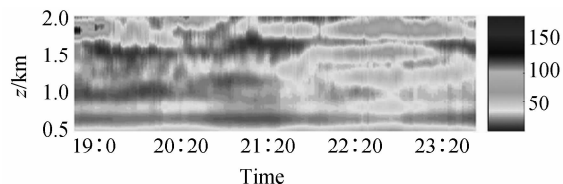


图 5 2009 年 10 月 22 日晚 19:20~23:20 气溶胶激光雷达比

Fig. 5 Lidar ratios during 19:20~23:20 in the night on October 22, 2009

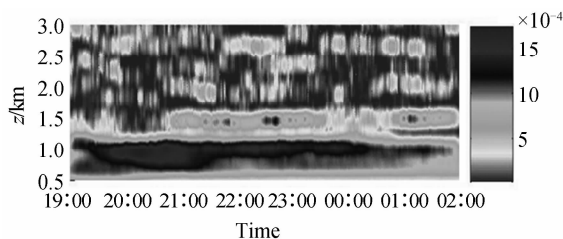


图 6 2009 年 10 月 13 日晚 19:00~02:00 气溶胶消光系数

Fig. 6 Extinction coefficients during 19:00~02:00 in the night on October 13th, 2009

轻度污染. 这与本课题组在十月份用 Raman 激光雷达检测的气溶胶状况一致.

## 4 结论

武汉市位于江汉平原东部, 长江中游与长江、汉水交汇处, 属北亚热带季风性湿润气候区, 是热带海洋气团和极地大陆气团交替控制和互相角逐交绥的地带, 气候随季节性变化明显. 因此, 能够对气溶胶进行实时监测, 是保证测量准确性的前提条件.

本文利用自行研制的 Raman 激光雷达系统, 探测反演了武汉上空的气溶胶光学特性的垂直分布. 激光雷达具有很高的时间和空间分辨率, 是其他传统探测手段无法比拟的. 以后可以利用此 Raman 激光雷达系统长期观测武汉地区气溶胶光学特性, 并研究气溶胶的变化规律. 为研究气候气象的变化、空气质量的监测及大气校正等遥感应用提供有力数据支持.

### 参考文献

- [1] SUN Juan. Retrieval of aerosol optical depth by hyper spectral remote sensing and its environmental impact [D]. Shanghai: East China Normal University, 2006; 3-4.  
孙娟. 气溶胶光学厚度的高光谱遥感反演及其环境效应[D]. 上海: 华东师范大学, 2006; 3-4.
- [2] PAPPALARDO G, AMODEO A, PANDOLFI M, *et al.* Aerosol lidar intercomparison in the framework of the EARLINET project. 3. Raman lidar algorithm for aerosol extinction, backscatter, and lidar ratio[J]. *Appl Opt*, 2004, **43** (28): 5370-5385.
- [3] WANG Xiao-bin, HU Huan-ling, LI Chen, *et al.* Raman-Mie lidar measurements of aerosol wavelength exponent in the troposphere [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, **3**(23): 341-345.  
王晓宾, 胡欢陵, 李琛, 等. Raman-Mie 激光雷达探测对流层气溶胶波长指数[J]. 量子电子学报, 2006, **3**(23): 341-345.
- [4] TESCHE M, ANSMANN A, MÜLLER D, *et al.* Particle backscatter, extinction, and lidar ratio profiling with Raman lidar in south and north China [J]. *Appl Opt*, 2007, **46** (25): 6302-6308.
- [5] YAN Ji-xiang, GONG Shun-sheng, LIU Zhi-shen. Environmental monitoring laser radar [M]. Beijing: Science Press, 2001: 173-174.  
阎吉祥, 龚顺生, 刘智深. 环境监测激光雷达[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 173-174.
- [6] RUSSO F, WHITEMAN D N, DEMOZ B, *et al.* Validation of the Raman lidar algorithm for quantifying aerosol extinction [J]. *Appl Opt*, 2006, **45** (27): 7073-7075.
- [7] LIU Zhao-yan, HUNT W, VAUGHAN M, *et al.* Estimating random errors due to shot noise in backscatter lidar observations [J]. *Appl Opt*, 2006, **45** (18): 4437-4440.
- [8] WU Yong-hua, HU Shun-xing, QI Fu-di, *et al.* Raman lidar measurements of aerosol and cloud optical properties in the troposphere [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **11** (1): 73-78.
- [9] ANSMANN A, WANDINGER U, RIEBESELL M, *et al.* Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar [J]. *Appl Opt*, 1992, **31** (33): 7113-7128.

## Measurements of Aerosol Optical Properties by Raman Lidar

ZHANG Jin-ye<sup>1,2</sup>, GONG Wei<sup>1</sup>, HUANG Chu-yun<sup>2</sup>, LI Jun<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

(2 School of science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** The Raman multi-channels lidar developed by Wuhan University is described. The design principles of the whole system and main technical parameters are provided. The methods for retrieving aerosols' optical properties such as atmospheric aerosol extinction coefficient, backscattering coefficient and lidar ratio are presented in detail, and the key part of retrieving the aerosol extinction coefficient is discussed and analyzed. The real-time detections of optical properties for aerosol, cloud and boundary layer in the low-altitude atmosphere are done. The experiments show that the multi-channels Raman lidar system has good performance for detecting the vertical distribution of aerosols in the night and it is reliable.

**Key words:** Raman lidar; Aerosol; Extinction coefficient; Backscattering coefficient; Lidar ratio



**ZHANG Jin-ye** was born in 1981. She is a Ph. D. degree candidate at Wuhan University and a lecturer of Hubei University of Technology. Her research interests focus on optoelectronic technologies and laser remote sensing.



**GONG Wei** was born in 1970. He is a professor and Doctoral Supervisor at Wuhan University. Now his research interests focus on optical and laser remote sensing hardware technology, object extraction and recognition, spatial information analysis and processing.