

文章编号: 0258-7025(2010)07-1721-05

# 车载式 1064 nm 米氏散射激光雷达的研制

袁 林 刘 博 王邦新 钟志庆 陈 涛 戚福弟 周 军

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 为了探测大气气溶胶 1064 nm 波长后向散射系数垂直廓线和大气水平能见度, 研制了一台车载式 1064 nm 米氏散射激光雷达系统(MMSL)。介绍了该激光雷达系统的结构和技术指标, 叙述了光学机械结构的设计与装校, 解决了激光雷达系统结构的稳定性、激光发射光束与接收光学单元光轴的平行以及运输过程中的防振等问题。简要叙述了相关的数据处理方法, 给出了该激光雷达与美国 Belfort 6230A 能见度仪探测大气能见度的对比结果, 两者具有较好的一致性。与较早前研制成功并已应用于常规观测的一台 532 nm 米氏散射激光雷达进行了大气后向散射系数的对比验证实验, 两者的探测结果具有很好的相关性。结果表明, 该激光雷达具有较高可靠性和准确性。

**关键词** 激光雷达; 米氏后向散射系数; 光学机械设计; 气溶胶

中图分类号 TN958.58 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103707.1721

## Design of Mobile 1064 nm Mie Scattering Lidar

Yuan Lin Liu Bo Wang Bangxin Zhong Zhiqing Chen Tao Qi Fudi Zhou Jun

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** A mobile 1064 nm Mie scattering lidar system has been developed which can measure the vertical aerosols backscatter coefficient and horizontal visibility. The configuration and specifications of the Mie scattering lidar system are presented and the designed alignment of the optical mechanic unit is described. As a mobile system, the transportation stability of the lidar system is solved and the optical transmitting and receiving axis are well aligned. Validation experiments are made in Hefei. The vertical backscatter measurement is compared with another 532 nm Mie scattering lidar and the visibility measurement is compared with Belfort 6230A visibility sensor. Both results are in good agreement which indicates the new made mobile 1064 nm Mie scattering lidar is stable and reliable.

**Key words** lidar; Mie backscatter coefficient; optical and mechanical design; aerosol

## 1 引 言

激光工程应用中通常使用 1064 nm 作为工作波长, 因此人们对 1064 nm 激光的大气透射率特性十分关注。为了满足激光工程的应用需求及对 1064 nm 激光大气传输特性进行研究<sup>[1~3]</sup>, 研制了一台车载式 1064 nm 米氏散射激光雷达系统(MMSL), 用于探测 1064 nm 波长大气的水平能见度和后向散射系数垂直廓线<sup>[4,5]</sup>。

本文介绍了 MMSL 的总体结构和技术指标, 叙述了光学机械的设计与装校等技术, 解决了激光雷达系统结构的稳定性、发射激光与接收光学单元光轴的平行以及系统防振等问题。对比验证实验表明该台激光雷达满足设计要求, 目前已交付使用。

## 2 MMSL 的总体结构和技术指标

MMSL 系统由发射光学单元、接收光学单元、

收稿日期: 2009-09-18; 收到修改稿日期: 2009-11-18

基金项目: 国家 973 计划(2006CB403702)和国家青年科学基金(40805014)资助课题。

作者简介: 袁 林(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学精密仪器及机械方面的研究。

E-mail: yuanlin@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 周 军(1945—), 男, 研究员, 主要从事激光雷达技术和激光大气遥感探测等方面的研究。

E-mail: jzhou@aiofm.ac.cn(通信联系人)

后继光学单元、信号探测单元和信号采集与控制单元以及相关辅助设备组成。为了适应车载的安装与运行,整个系统采用分离式模块化结构设计<sup>[6]</sup>,即将发射光学单元、接收光学单元、后继光学单元和信号探测单元组合为一个整体独立模块;信号采集与控制单元组合为一个整体独立模块。MMSL 系统的结构框图和工作效果图如图 1 和图 2 所示。MMSL 系统的主要技术参数如表 1 所示。

MMSL 系统工作时,首先由主控计算机内的运行软件发出指令给 Nd:YAG 激光器,激光发射单元以 15 Hz 重复频率向大气中水平发射 1064 nm 波长的激光脉冲,每一发激光脉冲被传输路径上的各个距离上的大气所散射,其中大气的后向散射光被接收望远镜收集,通过后继光学单元以后被信号探测器雪崩光电二极管(APD)接收并转换为电信号,数据采集器(A/D)按照设定的距离分辨率对电信号分层进行采集,并将采集的大气后向散射信号数据存入工控机内的原始信号数据库中。激光雷达重复上述过程,直到完成运行软件设定的发射激光脉冲数为止。

对所有采集的大气回波信号进行处理,放入数据库存储并实时显示。整个测量过程中,激光雷达是无人值守和干预的全自动工作。

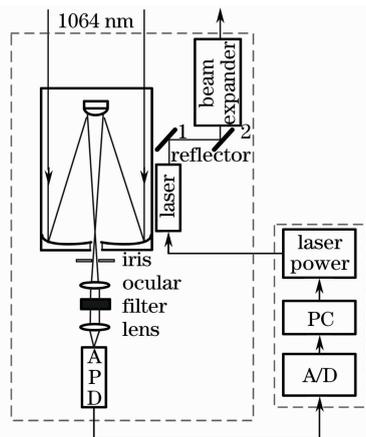


图 1 雷达系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of MMSL system



图 2 MMSL 实物照片

Fig. 2 Picture of MMSL system

表 1 MMSL 系统的技术参数

Table 1 Specifications of MMSL system

Transmission unit		Signal receiving and detecting unit	
Laser	Nd:YAG	Telescope	200 mm diameter
Wavelength /nm	1064	Field of view /mrad	0.5~1
Energy per pulse /mJ	200	Central Wavelength of filter /nm	1064
Repetition rate /Hz	15	Bandwidth /nm	0.5
Expander	5×	Detector	APD
Beam divergence /mrad	0.3	Data acquisition	A/D

### 3 MMSL 系统的设计

MMSL 整体分为上下两个部分。激光发射单元、接收望远镜、后继光学单元以及信号探测单元固定在一个铝合金框架之内,框架通过两个支撑臂固定在安装平台上,平台通过隔振器与机柜相连接;信号采集单元、激光器电源、工控机以及辅助高压电源等其他电子学设备集成在一个机柜之内。机柜采用焊接结构,机柜底部通过 8 个地角螺栓和车厢底部紧固连接在一起。上下部分的信号传输通过管线连接。

#### 3.1 发射、接收和后继光学单元

发射、接收与后继光学单元均刚性连接固定在铝合金框架内,这种一体化的光学机械结构保证了发射光路和接收光路的相对稳定性。考虑到激光雷达的轻便性,框架采用铝合金搭建,结构牢固且质量轻;其他光机组件材料也大多采用铝材。如图 3 所示,采用这种框架机构,拆卸和运输方便。

激光发射单元布置在框架中间的 optical 平台上,包括 Nd:YAG 激光器、两个反射镜组成的导光单元以及一个 5 倍扩束镜系统。

Nd:YAG 激光器是国内目前技术发展较为成

熟的一种激光光源,增益大,激光阈值低,晶体导热性能好,可以高重复频率输出,激光器的主电源及参数可以通过计算机进行设置。MMSL 中使用激光器的基频输出 1064 nm 近红外光,只有振荡级,无放大级,且无需倍频晶体,使用更加可靠。

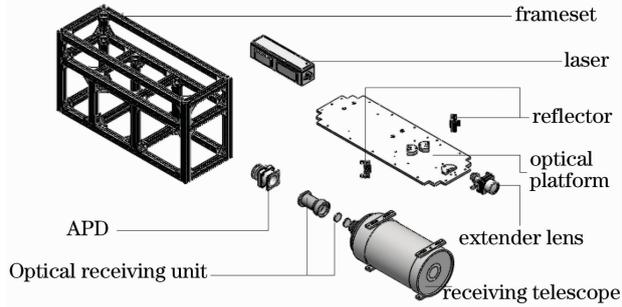


图 3 雷达系统结构分解图

Fig. 3 Exploded views of MMSL system

由于 MMSL 是一个双轴系统,必须保证发射的激光光束与接收望远镜的光轴平行,可通过调整导光单元来完成。它由两块可以在 X-Y 平面内调节的高精度二维反射镜架机构组成,镜片表面镀有介质膜,对 1064 nm 波长激光具有很高的反射率。由于激光发射单元和接收望远镜的机械与光学结构十分稳定,两光轴不会因为外部振动而发生改变,长时间内一直保持平行。因此,不需要每次测量前都进行发射激光光束与接收光学单元光轴平行的调整。

扩束镜的倍率为 5×,将激光器发出激光的发散角由 1.5 mrad 减小为 0.3 mrad,因此接收望远镜的接收视场可以调节到 0.5 mrad,以减小白天的天空背景辐射,提高系统探测的信噪比。

系统的光学接收单元采用通光口径为 200 mm 的卡塞格林型光学望远镜,用于接收 1064 nm 激光大气后向散射回波信号,相对孔径为  $f/10$ ,接收视场限制在 1 mrad 以内。望远镜有手动调焦机构,便于修正温差造成的光学失焦。为了能够对这一波长的光信号进行有效的接收,接收望远镜镀有对 1064 nm 波长具有高反射率的介质膜层。

后继光学单元和信号探测器通过法兰盘紧密地固定在接收望远镜的后部。后继光学单元由小孔光阑、目镜、窄带滤光片和透镜组成。小孔光阑安装在望远镜焦点处,调节光阑直径以改变望远镜接收视场大小。第一块透镜为目镜,由 JGS1 石英玻璃制成,其功能是将接收望远镜收集的大气后向散射光转变为较小直径的平行出射光束。选用高光谱透射率高截止率的超窄带干涉滤光片作为光学滤波器件,带宽 0.5 nm,以滤除大部分的天空背景辐射。

平行光束经过滤光片后再用一块透镜对其进行会聚,使全部接收的回波光都能入射到探测器件的光敏面。光学单元的目镜及会聚透镜镀有 1064 nm 波长的高透射率介质膜镀层,以提高这一波长的有效接收性能。整个后继光学单元采用密封结构,内表面进行了表面氧化处理,具有防尘、防漏光和防多次散射的作用。

光学装校以后,接收望远镜的光轴、小孔光阑中心和后继光学单元的光轴彼此重合,整个导光系统采用管套密封,以防近距离的散射光对探测产生干扰。

### 3.2 支撑臂与隔振器

MMSL 支撑臂的设计采用受力均衡的双轴旋转结构,如图 2 所示。支撑臂的上部通过两根轴连接到框架两侧面的固定板上,下部底座和机柜顶上的隔振器连接。轴上刻有刻度线,只需与旋转体上的刻线盘重合,即可调整到工作所需要的俯仰角度。

MMSL 的框架和支撑臂作为一个整体,通过 4 个 45° 斜放置的隔振器和下面机柜连在一起,如图 4 所示, $F$  为隔振器的受力方向。根据所要支撑的总重量,选择性能参数满足要求的隔振器。在设计过程中,隔振器应均匀地布置,力求使系统支承刚度中心与设备的质心重合,尽可能减少系统振动耦合现象。

车在运行过程中,机柜可以视为刚体,与车厢底部固定不动。隔振器采用了 45° 分布放置,当车变速行驶的时候,由于惯性,整个上部框架还会有继续运动的趋势,此时,两个相对布置的隔振器,一个压缩一个拉伸,相互制约,可以限制整个系统的运动,达到减振的目的。由于水平方向振动可以得到极大的抵消,这样可以提高系统的稳定性。

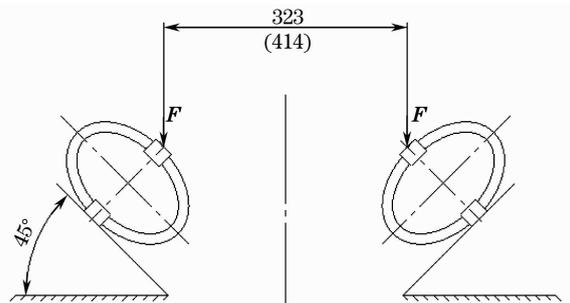


图 4 隔振器的分布

Fig. 4 Disposal of the shock absorber

### 3.3 信号探测单元和信号采集与控制单元

信号探测和采集单元对 1064 nm 米氏散射激光雷达接收到的大气后向散射光进行光电转换、放大和采集。它主要包括 APD,放大器,A/D 采集卡和工控机等。

由于所需探测的 1064 nm 波长的回波信号位于近红外波段,故选用在这一波段具有较高量子效率的高灵敏度、快响应和低噪声的 APD 探测器件,APD 探测器对应 1064 nm 波长的量子效率已达 18%<sup>[7]</sup>。系统选用采集速率为 5 MHz (对应距离分辨率 0.03 km)、精度为 12 bit 的 A/D 采集卡作为模数转换装置,主控计算机选用抗干扰、性能稳定的工控机。

## 4 数据处理方法

### 4.1 水平能见度

通常认为大气在水平方向上是比较均匀的,因此水平方向上的米氏散射激光雷达方程<sup>[8]</sup>可写为

$$P(Z) = C\beta\exp(-2\alpha_H Z)/Z^2, \quad (1)$$

式中  $P(Z)$  是激光雷达接收的大气后向散射光的回波功率; $C$  是激光雷达系统常数; $\beta$  是大气水平后向散射系数; $\alpha_H$  是大气水平消光系数。对(1)式两边取对数并对距离  $Z$  求导得出

$$\frac{d\{\ln[P(Z)Z^2]\}}{dZ} = \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dZ} - 2\alpha_H. \quad (2)$$

由于大气水平均匀,故  $d\beta/dZ = 0$ 。因此,对  $\ln[P(Z)Z^2]$  和  $Z$  进行最小二乘法线性拟合,如(2)式所示,拟合直线斜率的一半则是这段大气水平消光系数  $\alpha_H$ ,它包含来自大气中气溶胶粒子和空气分子的共同贡献。这就是确定大气消光系数  $\alpha_H$  的斜率法<sup>[9,10]</sup>。

由 Kruse 关系式<sup>[11]</sup>可知消光系数与水平能见度  $V$  的关系

$$V = \frac{3.912}{\alpha_H} \left(\frac{\lambda}{550}\right)^{-q}, \quad (3)$$

式中  $q$  为波长修正因子,其取值与水平能见度的关系为

$$q = \begin{cases} 0.585V^{1/3} & V \leq 6 \\ 1.3 & 6 < V < 50 \\ 1.6 & V \geq 50 \end{cases}. \quad (4)$$

### 4.2 垂直后向散射系数

米氏散射激光雷达发射的激光光束通过大气时,大气中的空气分子和气溶胶粒子会对激光光束产生散射和吸收作用。米氏散射激光雷达在高度  $Z$  处接收的大气后向散射回波功率  $P(Z)$  由米氏散射激光雷达方程表示为

$$P(Z) = P_0 C [\beta_a(Z) + \beta_m(Z)] T_a^2(Z) T_m^2(Z) / Z^2, \quad (5)$$

式中  $P_0$  为激光发射功率, $\beta_a(Z)$  和  $\beta_m(Z)$  分别是高

度  $Z$  处大气气溶胶和大气分子的后向散射系数;

$$T_a(Z) = \exp\left[-\int_0^Z \alpha_a(z') dz'\right]$$

是米氏散射激光雷达与高度  $Z$  间的大气气溶胶透射率, $T_m(Z) = \exp\left[-\int_0^Z \alpha_m(z') dz'\right]$  是相应的大气分子透射率, $\alpha_a(Z)$  和  $\alpha_m(Z)$  分别为高度  $Z$  处气溶胶和大气分子消光系数。通过激光雷达探测接收的回波信号,求解激光雷达方程,利用 Fernald 方法<sup>[12]</sup>即可得到气溶胶的后向散射系数的垂直廓线。

## 5 MMSL 的可靠性验证试验

为了验证 MMSL 探测数据的可靠性,其水平能见度的测量结果和 Belfort 能见度仪进行了比较。垂直后向散射系数的测量结果和较早前研制成功的一台 532 nm 米氏散射激光雷达进行了比较。

### 5.1 水平能见度对比试验

为了检测 MMSL 探测大气水平能见度的准确性,在合肥地区与美国 Belfort 能见度仪进行了大气水平能见度测量结果的比对。美国 Belfort Model 6230A 型号能见度仪是根据气溶胶粒子的前向散射特性,测量气象光学视距(MOR),数据可靠。试验时间选在 2009 年 6 月 23 日,10:00~20:00,天气晴朗,目视能见度约 7 km,对比测量结果如图 5 所示。可以看出,在整个测量过程中大气水平能见度在 5~8 km 之间变化,两种仪器测量的结果吻合较好,证明了 MMSL 测量大气水平能见度的可靠性。

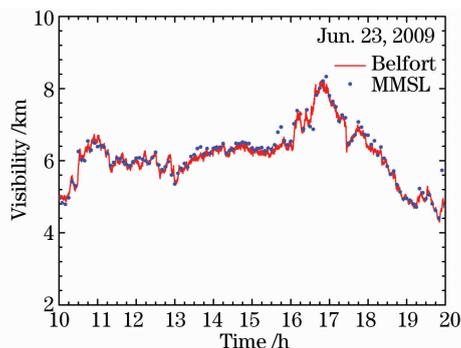


图 5 MMSL 和 Belfort 能见度仪的对比结果  
Fig. 5 Comparison result of MMSL and Belfort visibility sensor

### 5.2 垂直后向散射系数对比试验

为验证该激光雷达探测垂直后向散射系数的可靠性,在同一地点和时间与较早前研制成功的一台 532 nm 米氏散射激光雷达(ML)进行对比测量。ML 已经用于常规观测 532 nm 的气溶胶后向散射系数多

年,数据稳定可靠。2009年6月24日20:55的对比结果如图6所示,由于这两台激光雷达探测所用的波长不一样,所以两者探测的后向散射系数垂直廓线有差别,但是可以看出两者在0.3~4 km高度范围内具有很好的平行度,包括1.2 km处的细微结构。0.3 km以下由于接近地面,这里的大气气溶胶粒子的谱分布和粒径大小很复杂,会造成这两个波长探测的后向散射系数平行度降低,但是两者在这段高度区间的结构还是一样的,所探测的1064 nm垂直后向散射系数介于 $10^{-4}$ ~ $10^{-2}$ 之间,符合常年的统计规律,证明MMSL探测结果切实可靠。

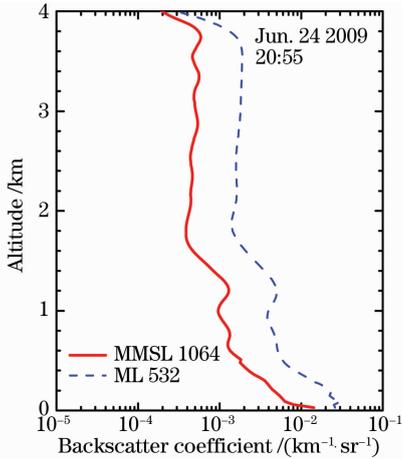


图6 两台激光雷达探测气溶胶后向散射系数垂直廓线的比较

Fig. 6 Comparison result of MMSL and ML

## 6 结 论

MMSL系统可用于水平能见度和大气后向散射系数垂直廓线的探测,通过它和美国Belfort 6230A能见度仪以及较早前研制成功并已应用于常规观测的532 nm米氏散射激光雷达进行的对比验证实验显示其结果具有很好的一致性。这表明,

该激光雷达探测数据稳定可靠,完全满足使用要求。

## 参 考 文 献

- 1 F. G. Fernald. Analysis of atmospheric lidar observation; some comments [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652~653
- 2 T. Takamura, Y. Sasano. Ratio of aerosol backscatter to extinction coefficients as determined from angular scattering measurements for use in atmospheric lidar applications [J]. *Optical and Quantum Electronics*. 1987, **19**: 293~302
- 3 J. Lefrere, J. Pelon, C. Cahen *et al.*. Lidar survey of the post Mt. St. Helens stratospheric aerosol at Haule Province Observatory [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(7): 1116~1117
- 4 Wang Jiang'an, Kang Sheng, Wu Ronghua *et al.*. Method for calculating visibility utilizing optic ways [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 283~289  
王江安, 康 圣, 吴荣华等. 能见度光学测量方法 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 283~289
- 5 Bo Guangyu, Zhong Zhiqing, Liu Bo *et al.*. Design of optical receiver and signal detection unit for combined Rayleigh-Raman-Mie lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3020~3025  
伯广宇, 钟志庆, 刘 博等. 瑞利-拉曼-米氏激光雷达光学接收和信号检测设计 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3020~3025
- 6 Ding Hongxing, Dai Lili, Xue Guogang *et al.*. Study of compact Mie scattering lidar and its designing, assembling and debugging processes [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(9): 850~853  
丁红星, 戴丽莉, 薛国刚等. 小型Mie散射激光雷达系统设计与装校 [J]. *激光与红外*, 2006, **36**(9): 850~853
- 7 Single Photon Counting Module SPCM-AQR Series Data Sheet [R]. PerkinElmer Optoelectronics, Canada, 2001
- 8 G. J. Kunz, G. Leeuw. Inversion of lidar signals with the slope method [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(18): 3249~3256
- 9 S. W. Dho, Y. J. Park, H. J. Kong. Experimental determination of a geometric form factor in a lidar equation for an inhomogeneous atmosphere [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(24): 6009~6010
- 10 Yang Yang, Zhao Yuan, Qiao Lijie *et al.*. Atmosphere transmission property of 1.06  $\mu\text{m}$  laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, **28**(1): 15~19, 35  
杨 洋, 赵 远, 乔立杰等. 1.06  $\mu\text{m}$ 激光的大气传输特性 [J]. *红外与激光工程*, 1999, **28**(1): 15~19, 35
- 11 P. W. Kruse, L. D. McGlauchin, R. B. McQuistan. Elements of infrared technology: generation, transmission and detection [M]. New York: Wiley, 1962
- 12 K. Tomine, C. Hirayama, K. Michimoto *et al.*. Experimental determination of the crossover function in the laser radar equation for days with a light mist [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(12): 2194~2195