

# 新型微脉冲激光雷达测量大气水平能见度

吕立慧 刘文清 张天舒 陆亦怀 董云升 陈臻懿 范广强 亓少帅

(中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 重点设计了微脉冲激光雷达(MPL)系统的后继光学单元,是一种新型的设计。使用收发一体 Y 型光纤束改变传统的激光雷达后继光学结构,实现系统的收发同轴设计。分析了新型微脉冲激光雷达在合肥地区实验观测结果,利用分段斜率法反演气溶胶水平消光系数,获得了大气能见度及变化特征,具有明显的日变化特征,并与 HW-N1 型前向散射式能见度仪测量结果进行了对比,二者相关系数达到 0.81。此外,理论误差分析结果也表明当能见度在 10 km 以下时 MPL 的测量误差小于 20%。说明了该 MPL 系统能够实现对大气水平能见度的有效测量。

**关键词** 测量; 激光雷达; 水平能见度; 光纤; 消光系数

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0908005

## A New Micro-Pulse Lidar for Atmospheric Horizontal Visibility Measurement

Lü Lihui Liu Wenqing Zhang Tianshu Lu Yihuai Dong Yunsheng Chen Zhenyi  
Fan Guangqiang Qi Shaoshuai

(Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** A new micro-pulse lidar (MPL) system used for atmospheric horizontal visibility measurement is developed, especially the optical unit. The system uses a Y-fiber bundle instead of mirrors in the traditional lidar system, not only improving the compact of the structure, but also solving the problem that is always very difficult to adjust the transmitting and receiving optical paths to parallel in the traditional system, so that it can avoid the influence of the geometrical overlap factor and reduce the complexity of the data processing. This paper analyzes the experimental results of the new MPL in Hefei, and uses the sub-slope method invert aerosol extinction coefficients to obtain atmospheric visibility and its variation. According to the results, the atmospheric visibility has a clear diurnal variation. The correlation coefficient between the results and the other measured by HW-H1 type forward scatter visibility instrument is 0.81. In addition, the theoretical error analysis results also show that MPL measurement error is less than 20% when the visibility is less than 10 km, indicating that MPL system can achieve the measurement of the atmospheric horizontal visibility effectively.

**Key words** measurement; lidar; horizontal visibility; fiber; extinction coefficient

**OCIS codes** 280.1100; 280.1120; 290.2200; 280.3640

## 1 引言

能见度是反映大气透明度的指标,是重要气象观测要素之一。按照地面气象观测规范,大气水平能见度是指在当时的天气条件下,视力正常(对比感阈为 0.05)的人,白天能从天空背景中看到和辨认

的目标物(黑色、大小适度)的最大水平距离或晚上中等强度的发光体能被看到和识别的最大水平距离<sup>[1]</sup>,实际上也是气象光学视程。

人工目测是最早的能见度测量方法,但实时性、客观性较差,因此仪器测量成为能见度测量的必然

**收稿日期**: 2014-03-26; **收到修改稿日期**: 2014-05-05

**基金项目**: 国家自然科学基金(41205119、41305126)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120024)

**作者简介**: 吕立慧(1989—),女,硕士研究生,主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: lhlv@aiofm.ac.cn

**导师简介**: 刘文清(1954—),男,研究员,博士生导师,主要从事环境光学特征、有害痕量气体光学与光谱学监测方法及新型环境监测技术等方面的研究。E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

发展趋势。目前国内外普遍采用透射式、前向散射式等点式测量方式<sup>[2]</sup>的能见度仪。激光雷达是继透射式、前向散射式能见度仪的一种新型的能见度观测工具,通过直接探测激光与大气相互作用的后向散射信号定量计算大气能见度。激光雷达具有监测范围广、时空分辨率高等特点,近年来已被广泛应用于环境与大气监测等领域<sup>[3-7]</sup>,是测量大气水平能见度的有效工具。

本文介绍了一种新型的微脉冲激光雷达(MPL)系统,用收发一体 Y 型光纤束代替传统的激光雷达后继光路进行光路传输实现收发共轴,可以对大气水平能见度进行有效测量。重点介绍了该新型 MPL 系统的构成,并对合肥地区的大气水平能见度进行了连续观测实验。

## 2 新型微脉冲激光雷达系统设计

该新型 MPL 系统采用收发一体的 Y 型光纤束实现了收发同轴设计,由一个卡塞格林望远镜同时作为光信号发射器和接收器。如图 1 所示,系统由激光发射单元、光学接收单元、信号探测与数据采集单元 3 部分组成。激光发射单元采用二极管抽运的 Nd:YAG 532 nm 激光器作为光源,接近于人眼最敏感的 550 nm,所以其测量出的大气水平能见度能够很好地和人眼视觉相结合。激光器发射出的激光束经光纤耦合器耦合进发射光纤,经准直扩束后,经望远镜水平射入大气。后向散射光被同一望远镜接收,所得的光信号经聚焦后耦合进光纤束的 8 根外层接收光纤,接收信号经接收光纤传输后通过窄带干涉滤光片去掉背景光,光电倍增管(PMT)探测信号并经光子计数器采集信号,最终送入计算机进行信号的存储和后续分析。MPL 系统的水平探测有效距离白天为 4 km,晚上 14 km。

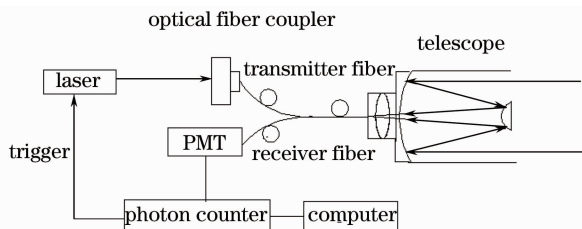


图 1 新型激光雷达系统样机结构图

Fig. 1 Diagram structure of the new micro-pulse lidar

收发一体的 Y 型光纤束结构如图 2 所示, A 为发射光纤端点,由单根光纤组成, B 为接收光纤端点, C 为发射光纤和接收光纤的结合端点,中间 1 根为发射光纤,外层 8 根为接收光纤。激光器发出的

激光束从端点 A 进入发射光线,由端点 C 进入望远镜发射,后向散射回波信号由同一望远镜接收,通过 C 端点外围接收光纤进入信号探测和数据采集单元。收发一体的 Y 型光纤束实现了激光雷达的收发同轴设计,不仅减小了激光雷达能见度仪的体积,使结构更紧凑,而且有效解决了非同轴激光雷达能见度仪发射与接收光路的调节问题,避免了几何重叠因子的影响,简化了数据处理难度。此外,与已有的同轴 MPL 系统<sup>[8]</sup>相比,该新系统以光纤代替传统的光学镜片实现收发光路的同轴设计,结构更简单有效,成本更低,系统的稳定性和可靠性更高,有效解决了传统共轴 MPL 系统因温度和机械振动等因素影响,机械稳定性和可移动性不能满足激光雷达常规运行需要的难题。

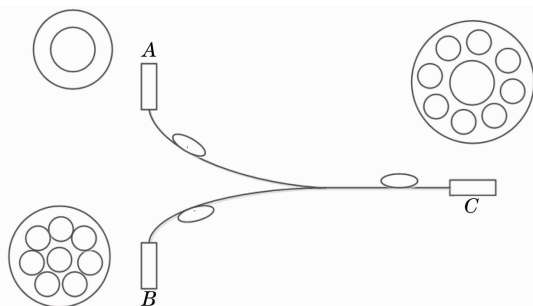


图 2 Y 型光纤束结构

Fig. 2 Diagram structure of the fiber bundle

表 1 给出了该激光雷达系统的主要技术参数。激光器以 2000 Hz 的重复频率发射 532 nm 波长的激光,脉冲能量为 30  $\mu$ J,可以满足人眼安全考虑。由于回波信号弱,PMT 输出端电流很小,模拟采集模式已不能正常工作,因此这里采用单光子计数模式。

表 1 新型 MPL 系统技术参数

Table 1 Parameters of the new MPL system

Item	Parameter
Transmitter type	Nd:YAG 532 nm
Pulse energy	30 $\mu$ J
Repetition frequency	2000 Hz
Pulse duration	9 ns
Divergence	0.5 mrad
Receiver telescope	Cassegrain
Diameter	203 mm
NA of fiber	0.22
Detector	PMT
Data acquisition	photo counter
Range resolution	7.5 m

在进行大气水平能见度测量时,将该 MPL 系统调整为水平状态,然后向大气发射  $2 \times 10^5$  发激光脉冲并采集后向散射回波信号,每条数据的测量时

间为 1~2 min,最后进行数据处理计算大气水平能见度。

### 3 大气水平能见度测量原理与数据处理方法

大气水平能见度的测量是根据柯西米德定律,通过反演大气消光系数实现的。由柯西米德定律<sup>[9]</sup>

$$K = \exp(-\alpha V), \quad (1)$$

容易推导出

$$V = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1}{K}, \quad (2)$$

式中  $K$  是对比阈值,是与入眼有关的物理量, $\alpha$  是大气消光系数, $V$  是大气水平能见度。因此大气能见度  $V$  由人眼的对比阈值  $K$ ,消光系数  $\alpha$  决定。求取气象能见度时对比阈值  $K$  常取 0.05。则由(2)式可推得气象能见度( $F_{\text{MOR}}$ )的表达式为<sup>[10]</sup>

$$F_{\text{MOR}} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1}{0.05} = \frac{3}{\alpha}. \quad (3)$$

因此测量能见度的核心问题是如何准确探测大气的消光系数。激光雷达式能见度仪是通过测量大气后向散射信号强度计算大气消光系数,进而计算大气水平能见度。

消光系数的反演,目前主要有斜率法<sup>[11]</sup>、Fernald 方法<sup>[12]</sup>。利用激光雷达对大气进行水平探测的情况下,一般采用斜率法求解水平消光系数的分布。对于微脉冲激光雷达,接收到的  $r$  处的后向散射信号功率  $P(r)$  为

$$P(r) = CP_0 r^{-2} \beta \exp(-2\alpha r), \quad (4)$$

式中  $P(r)$  是激光雷达接收到的信号功率, $C$  是激光雷达系统常数, $P_0$  是激光发射功率, $r$  是探测距离, $\beta$  是大气后向散射系数, $\alpha$  是大气消光系数。对(4)式

两边取对数并对  $r$  求得

$$\frac{d\{\ln[P(r)r^2]\}}{dr} = \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dr} - 2\alpha, \quad (5)$$

在大气水平均匀的条件下, $\frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dr} = 0$ 。因此,对  $\ln[P(r)r^2]$  和  $r$  进行最小二乘法线性拟合,拟合曲线斜率的一半就是大气消光系数。在实际测量时,水平大气并不均匀,但一段距离内的大气可以认为是均匀的,因此可以用分段斜率法计算大气水平消光系数<sup>[13]</sup>。

激光雷达接收到的后向回波散射信号中包括天空背景噪声和电子学器件的热噪声,需要在数据处理前对原始数据进行背景噪声的扣除。本新型激光雷达系统 12~14 km 范围内的后向散射回波信号基本无变化,所以将此距离范围内的回波信号平均值作为背景信号从原始信号中扣除。

### 4 实验测量结果分析

图 3(a)为 2013 年 11 月 11 日 18 点到 12 日 18 点连续观测的 24 h 大气气溶胶消光系数的时空分布。从图中可以看出,在空间分布上,大气水平分布并不均匀,11 日 18 点到次日早 8 点,距测量地点 0.7 km 处的消光系数明显大于 1.5 km 处,而在 9 点以后,1.5 km 处的消光系数又明显高于 0.7 km 处;在时间分布上,晚 8 点至次日早上 7 点,由于人类活动的逐渐减少,消光系数逐渐减小;次日早 8 点以后,由于人类活动逐渐增强,大气气溶胶消光系数逐渐增大。图 3(b)为 12 日 11 点 21 分大气气溶胶消光系数廓线。由图可以看出,该时刻距离测量地点 0.7~1.4 km 的范围内,大气气溶胶消光系数基

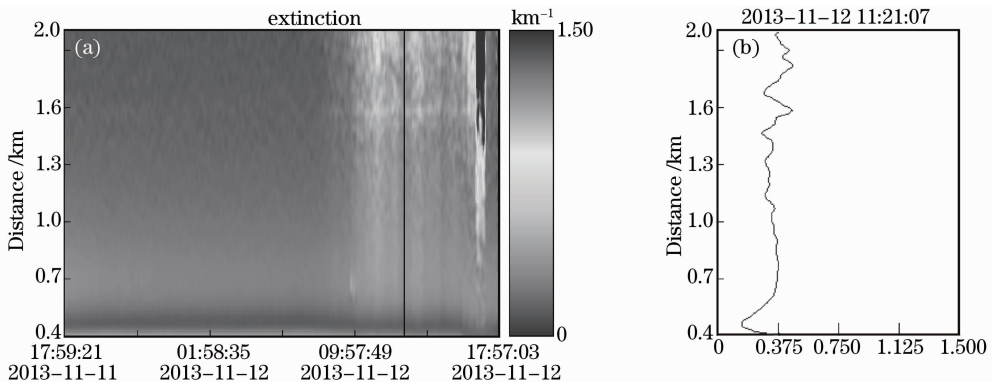


图 3 (a) 24 h 的大气气溶胶消光系数时空分布; (b) 大气气溶胶消光系数廓线

Fig. 3 (a) Time-space distribution of atmospheric aerosols extinction coefficient in 24 h; (b) profile of atmospheric aerosol extinction coefficient

本不变,大气水平消光系数  $\alpha = 0.38 \text{ km}^{-1}$ , 对应当时的大气水平能见度  $V = 7.9 \text{ km}$ 。此外,距离探测地点  $1.5 \text{ km}$  左右消光系数明显变大,这可能是在水平路径上探测到了污染物。

为了验证本文中介绍的新型 MPL 系统在水平能见度测量方面的可靠性,将测量结果与 HW-N1 型前向散射能见度仪进行了对比。HW-N1 型前向散射仪<sup>[14]</sup>是中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的大气能见度测量仪器,它是采用前向散射原理对大气气象能见度进行测量,目前已安装到安徽省高速公路进行全天候的能见度实时监测。

图 4 为 2013 年 11 月 11 日 20 时至 12 日 20 时,在合肥科学岛用新型 MPL 测量大气水平能见度的结果与安徽气象局公布的位于董铺岛西南方向  $6 \text{ km}$  处的蜀山站 HW-N1 型前向散射仪结果的对比图。图 4 中圆点曲线为微脉冲激光雷达测量的能见度小时均值图,小时均值是通过随机选取各小时内几个相邻时刻测量结果并取平均值达到的,方形数据为 HW-N1 型前向散射仪的测量结果。两种观测结果日变化趋势一致,日变化中水平能见度小时均值的最大值均在夜晚 23:00 左右,最小值均出现在早 8:00 左右。此外,两种观测结果的绝对值有一定差异。有研究结果表明<sup>[15]</sup>,空气污染物浓度的变化是影响大气能见度的主导因素,风速、气压、天气情况和湿度等气象因子也是影响大气能见度的主要因素。考虑到仪器所在的位置,两者的风速、气压、天气情况和相对湿度等因素可认为大体一致,除此之外,蜀山站的环境为合肥绕城高速附近,受机动车排放影响,污染物浓度较大,而激光雷达位于合肥西郊董铺岛上,车流量很少,这应该为造成两者差异的主要因素。激光雷达测量的能见度与前向散射仪的变化趋势具有较好的一致性,能见度大小差异主要是由于环境差异引起的。

以该新型 MPL 测量结果为  $x$  轴,HW-N1 型前向散射仪测量结果为  $y$  轴做线性拟合,结果如图 5 所示。两组数据的相关系数达到了 0.81,说明用该

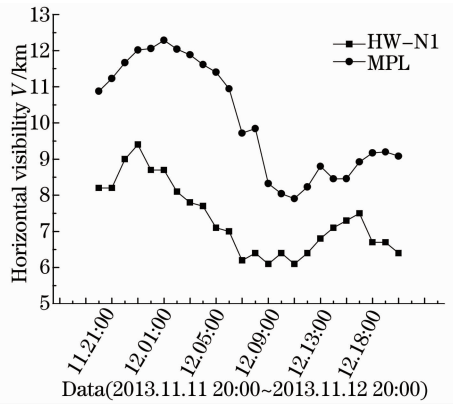


图 4 MPL 探测的水平能见度日变化趋势与 HW-N1 型前向散射仪结果对比

Fig. 4 Horizontal visibility daily variation taken by MPL and HW-N1 forward-scattering visibility sensor

新型 MPL 测量并用分段斜率法反演的结果具有很好的相关性。以上实验分析结果都说明了该新型 MPL 系统具有一定的可靠性。

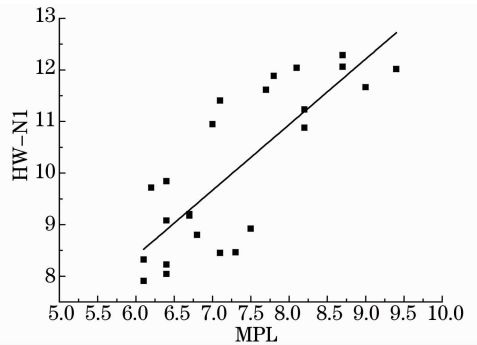


图 5 MPL 与 HW-N1 前向散射仪测量结果对比图

Fig. 5 Comparison diagram of the results between MPL and HW-N1 forward-scattering visibility sensor

### 5 误差分析

根据误差传递原理,对于该微脉冲激光雷达系统,假定在水平探测路径上距离探测地点  $r_1, r_2$  处接收到的后向散射回波信号分别为  $P(r_1)$  和  $P(r_2)$ 。则该微脉冲激光雷达探测到的大气水平能见度  $V$  的相对误差为<sup>[16]</sup>

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{V}{7.82(r_2 - r_1)} \left[ \frac{\Delta P(r_1)}{P(r_1)} + \frac{\Delta P(r_2)}{P(r_2)} \right] + \frac{2\Delta r_1}{r_1} + \frac{2\Delta r_2}{r_2} + \frac{r_1}{r_2 - r_1} \frac{\Delta r_1}{r_1} + \frac{r_2}{r_2 - r_1} \frac{\Delta r_2}{r_2}. \quad (6)$$

由(6)式可以看出,由激光雷达探测大气水平能见度  $V$  的相对误差与激光雷达采集的后向散射回波信号精度、探测距离精度与实际大气水平能见度有关,且

实际能见度越大,误差越大,图 4 中所示结果也证明了该结论。当  $r_1 = 1 \text{ km}, r_2 = 4 \text{ km}$  时,该微脉冲激光雷达在这两点处采集的后向散射回波信号误差

$$\frac{\Delta P(r_1)}{P(r_1)} = \frac{\Delta P(r_2)}{P(r_2)} = 0.05, \text{探测距离误差} \frac{\Delta r_1}{r_1} =$$

$$\frac{\Delta r_2}{r_2} = 0.05, \text{当实际能见度} V=10 \text{ km 时, 大气水平}$$

能见度  $\Delta V/V=20\%$ 。以上实验和理论分析都说明该新型微脉冲激光雷达系统能够用于大气水平能见度测量。

## 6 结 论

本文设计了一台新型 MPL 系统,用光纤代替传统的光学镜片进行光路传输实现收发共轴,不仅提高了系统结构的紧凑性,而且有效解决了传统激光雷达能见度仪发射和接收光路的调节问题,避免了几何重叠因子的影响,减小了数据处理的复杂程度,其中有效探测范围白天 4 km,晚上 14 km。通过分段斜率法对激光雷达接收到的后向散射回波信号进行了分析,处理结果与气象部门公布的 HW-N1 型前向散射仪做了对比,实际对比结果和理论误差分析均表明该新型激光雷达能够对大气水平能见度进行有效测量,验证了该新型激光雷达设计的合理性。

## 参 考 文 献

- China Meteorological Administration. Ground Weather Observation Criterion[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003.  
中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- Xing Xiangnan, Cui Yanmei, Zhang Fugen, *et al.*. Summary of present situation and development trend of visibility measurement technology[J]. Metrology and Measurement Technology, 2010, 30(5): 15-20.  
邢向楠, 崔岩梅, 张富根, 等. 能见度测量技术现状及发展趋势综述[J]. 计测技术, 2010, 30(5): 15-20.
- Dong Yunsheng, Liu Wenqing, Liu Jianguo, *et al.*. Application study of lidar in urban traffic pollution[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 315-320.  
董云升, 刘文清, 刘建国, 等. 激光雷达在城市交通污染中应用研究[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 315-320.
- Bo Guangyu, Liu Dong, Wang Bangxin, *et al.*. Two-wavelength polarization airborne lidar for observation of aerosol and cloud[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1014002.

- 伯广宇, 刘东, 王邦新, 等. 探测云和气溶胶的机载双波长偏振激光雷达[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1014002.
- Fan Guangqiang. Dual-channel polarization lidar monitoring of sandstorm and its transportation research[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(s1): s114006.  
范广强. 双通道偏振激光雷达监测沙尘暴污染及其输送研究[J]. 中国激光, 2011, 38(s1): s114006.
- He Tao, Hou Lujian, Lü Bo, *et al.*. Study of accuracy of lidar inversion PM<sub>2.5</sub> concentration[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0113001.  
何涛, 侯鲁健, 吕波, 等. 激光雷达探测反演 PM<sub>2.5</sub> 浓度的精度研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0113001.
- Shi Jianzhong, Cao Nianwen. Tropospheric aerosol measurement by lidar in northern suburbs of Nanjing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(10): 100101.  
施建中, 曹念文. 南京北郊对流层气溶胶激光雷达观测[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 100101.
- Zhang Damao, Xu Chidong, Yu Tong, *et al.*. Development of scanning micro pulse lidar and its applications[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2006, 1(1): 47-52.  
张大毛, 徐赤东, 虞统, 等. 扫描式微脉冲激光雷达的研制和应用[J]. 大气与环境光学学报, 2006, 1(1): 47-52.
- H Koschmieder. Theorie der horizontalen sichtweite[J]. Beitrz Physd Freien Atm, 1924, 12: 33-53.
- Weitkamp C Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere[M]. Berlin: Springer, 2005. 165-167.
- Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. Appl Opt, 1981, 20(2): 211-220.
- Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. Appl Opt, 1984, 23(5): 652-653.
- Du Qicheng, Ji Yufeng, Xu Chidong. Data processing method of aerosol horizontal distribution detected by MPL[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2008, 3(1): 23-27.  
杜其成, 纪玉峰, 徐赤东. MPL 探测气溶胶水平分布数据处理方法研究[J]. 大气与环境光学学报, 2008, 3(1): 23-27.
- Cheng Yin, Lu Yihuai, Lian Cuihua, *et al.*. Investigation on the forward-scattering visibility sensor[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2006, 1(1): 59-63.  
程寅, 陆亦怀, 连翠华, 等. 前向散射型能见度仪的研制[J]. 大气与环境光学学报, 2006, 1(1): 59-63.
- Wang Shouqiang, Zhai Anguo. Analysis on variation trend and influencing factors of visibility in atmosphere [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2013, (4): 235-236.  
王守强, 翟安国. 大气能见度变化趋势及影响因素分析[J]. 现代农业科技, 2013, (4): 235-236.
- Xie Chengbo, Han Yong, Li Chao, *et al.*. The vehicle-mounted lidar used for atmospheric horizontal visibility measurement[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(7): 971-975.  
谢晨波, 韩永, 李超, 等. 车载式激光雷达测量大气水平能见度[J]. 强激光与离子束, 2005, 17(7): 971-975.

栏目编辑:何卓铭