

doi: 10.3788/gzxb20124110.1140

微脉冲偏振激光雷达探测城市底层气溶胶

宋跃辉, 华灯鑫, 李仕春, 王玉峰, 狄慧鸽, 强力虎

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

摘 要:以单脉冲能量 $2 \mu\text{J}$, 重复频率 1 kHz 的 Nd: YAG 固体激光器为光源研发了一台便携式人眼安全可三维扫描的微脉冲偏振激光雷达系统, 可实现对城市底层气溶胶球形特性和分布情况的探测. 为保证在西北地区等高密度气溶胶聚集的地域, 实现近地表 $80 \sim 1\,000 \text{ m}$ 范围内的精确探测, 系统的光电检测采用模拟探测技术. 利用该激光雷达系统首次对冬季西安局部地区 $1\,000 \text{ m}$ 范围内大气气溶胶退偏比进行了俯仰扫描探测, 并分析了天气过程和地面状况对退偏比的影响. 实验结果表明, 探测期间无明显沙尘事件发生, 探测区域内气溶胶的退偏比在 0.1 左右, 在无绿化带的交通干道交叉口等局部区域, 受地面状况影响退偏比偏高, 并获得了退偏比值与天气过程的初步关系, 同时也验证了系统的可行性. 研究成果可对城市底层气溶胶的产生、传输及扩散特性研究提供科学数据.

关键词:气溶胶; 退偏比; 微脉冲偏振激光雷达

中图分类号: TN958.98; TP722.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2012)10-1140-5

0 引言

随着我国城市化、工业化的飞速发展, 汽车尾气及工业排放等产生的酸性球形颗粒物和以地面扬尘为主的非球形颗粒物已经成为城市底层气溶胶的主要来源, 对人类健康和生存环境造成了极大的危害, 其所包含的可吸入颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 更是直接威胁着人类的生命安全^[1-2]. 因此监测废气排放、地面扬尘等城市底层气溶胶的分布情况和变化趋势具有非常重要的意义, 已成为大气科学领域的研究热点.

自 1971 年 Schotland 首次发表关于偏振激光雷达测云的文章以来, 偏振激光雷达以其分辨率高、实时性好、探测范围广的优点, 在大气环境监测领域中的地位越来越重要^[3-7]. 偏振激光雷达不仅能够获得气溶胶的分布情况, 而且可依据气溶胶后向散射光偏振状态获得气溶胶的球形特性, 进而辨别气溶胶的种类^[8-11]. 汽车尾气和工业废气中的颗粒物呈现出较强的球形特性, 退偏比较低, 而地面扬尘属于非球形颗粒物, 退偏比较高. 显然, 偏振激光雷达能够根据退偏比辨别气溶胶的种类和来源, 为城市气溶胶的产生、传输及扩散特性研究提供了有力的工具.

目前, 偏振激光雷达主要用于云和气溶胶的探测研究. 在国外, Pal 和 Carswell 实现了云底和云内各部位退偏比的同时探测^[4-5]. Sassen 利用偏振激光雷达探测研究了不同形态云的退偏特性^[3,7]. Iwasaka 和 Hayashida 利用偏振激光雷达对美国圣海伦斯火山爆发前后的平流层气溶胶进行探测研究^[6]. 在国内, 中国科学院安徽光机所和青岛海洋大学也分别设计了偏振激光雷达系统, 对合肥和青岛上空的卷云、气溶胶进行了有效的探测^[9,11]. 然而, 目前国内外尚未利用偏振激光雷达对城市底层气溶胶的球形特性、分布情况和扩散特性进行探测.

因此, 本文以 Nd: YAG 固体激光器为光源, 自主研发了一台人眼安全可三维扫描的微脉冲偏振激光雷达系统, 实现底层大气气溶胶的球形特性探测. 由于一般光子计数检测模式微脉冲激光雷达探测低层高密度气溶胶聚集区域时, 易产生较大的计数误差, 从而影响低层区域气溶胶的探测准确度. 因此本文的光电检测方式采用了模拟检测技术, 结合自研的高增益高速放大电路, 实现了对近地表 $80 \sim 1\,000 \text{ m}$ 范围气溶胶的有效探测. 同时通过俯仰扫描有效地校正了几何因子对激光雷达近场测量的影响, 对西安局部地区 $1\,000 \text{ m}$ 以下气溶胶退偏比实现了连续

基金项目:国家自然科学基金(No. 41027004)和陕西省教育厅科研计划项目(No. 2010JK759, No. 11JK0909)资助

第一作者:宋跃辉(1980—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为偏振激光雷达 Email: songyuefei@xaut.edu.cn

责任作者/导师(通讯作者):华灯鑫(1964—), 男, 教授, 主要研究方向为激光雷达大气遥感探测技术及光电测试技术. Email: xauthdx@163.com

收稿日期:2012-02-26; **修回日期:**2012-06-26

且有效的探测实验,并结合天气过程和地面状况对实验结果进行分析和讨论.

1 系统结构和工作原理

图 1 为自主研发的微脉冲偏振激光雷达系统.激光器发射的线偏振脉冲激光束经扩束器扩束准直后,沿望远镜轴线射向大气;激光束在上升过程中与气溶胶颗粒物发生相互作用并产生不同偏振状态的后向米散射回波信号;回波信号由卡塞格林望远镜接收后,入射至偏振分光棱镜进行偏振分光;回波信号中的平行分量和垂直分量由光电倍增管进行光电转换,并导入自制高增益高速放大电路进行信号放大;后续的信号采集和数据处理由计算机完成.

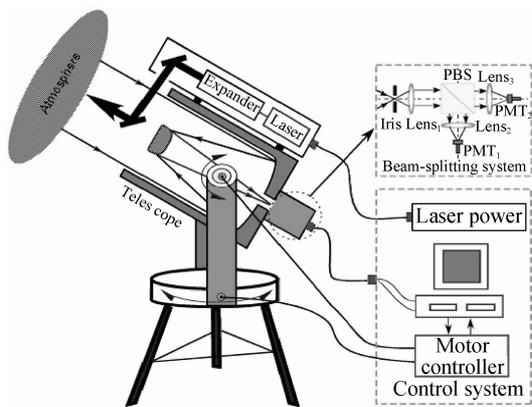


图 1 微脉冲偏振激光雷达系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the micro pulse polarization lidar

由图 1 可知,该系统采用具有三维扫描功能的望远镜,微脉冲激光发射系统通过机械装置安装在望远镜镜筒侧面,保证了发射与接收系统始终保持相对位置稳定.望远镜镜筒俯仰或水平扫描的仰角及方位角可以通过系统控制,实现自动扫描及姿态信息读取.微脉冲偏振激光雷达系统的主要参量如表 1.

表 1 微脉冲偏振激光雷达系统参量表
Table 1 System parameters of the micro pulse polarization lidar

Transmitter	Nd : YAG solid laser
Wavelength/nm	532
Pulse energy/ μ J	2
Pulse repetition frequency/kHz	1
Pulse duration/ns	3
Receiver	Schmidt-Cassegrain telescope
Diameter/mm	254
Field of view/mrad	0.2
Beam-splitting element	PBS
Extinction ratio	500 : 1
Detector	PMT: Hamamatsu R3896
Quantum efficiency/(%)	25

线偏振激光束在上升过程中与各种气溶胶相互作用,将产生不同偏振状态的后向散射光.球形气溶胶粒子,如汽车尾气中的颗粒物,不改变入射激光束的偏振状态,其后向散射光依然是线偏振光;而非球形气溶胶粒子,如沙尘气溶胶、卷云冰晶等,其后向散射光不再是线偏振光,且其后向散射光的偏振状态与气溶胶的形状有一定的依存关系.

气溶胶后向散射光中与激光束偏振方向平行的分量称为 P 光,与激光束偏振方向垂直的分量称为 S 光.由激光雷达方程可知, R 高度处气溶胶所产生的 P 光和 S 光功率分别可表示为

$$P_p(R) = \frac{k_p P_L}{R^2} \beta_p(R) \exp \left[- \int_0^R 2\alpha_p(R) dR \right] \quad (1)$$

$$P_s(R) = \frac{k_s P_L}{R^2} \beta_s(R) \exp \left[- \int_0^R (\alpha_p(R) + \alpha_s(R)) dR \right] \quad (2)$$

式中下标 P、S 表示与激光束偏振方向平行和垂直的两个方向, R 为探测高度, P_L 为激光器的脉冲功率, k_p 和 k_s 分别为 P 光探测通道和 S 光探测通道的系统常量, $\beta_p(R)$ 和 $\beta_s(R)$ 分别为 R 高度处的气溶胶后向散射系数的平行分量和垂直分量, $\alpha_p(R)$ 和 $\alpha_s(R)$ 分别表示 R 高度处大气消光系数的平行分量和垂直分量,对于随机取向的气溶胶粒子,这两个参量的值相等.

定义退偏比 δ 为

$$\delta(R) = \frac{P_s(R)/k_s}{P_p(R)/k_p} \quad (3)$$

定义偏振激光雷达标定因子 $K = k_p/k_s$,则退偏比又可表示为

$$\delta(R) = K [P_s(R)/P_p(R)] \quad (4)$$

显然,通过探测不同高度处 P 光和 S 光的回波信号功率,利用式(4)就可以计算出不同高度处气溶胶的退偏比.

目前,一般认为汽车尾气和工业废气主要是酸性的球形颗粒物,其退偏比小于 0.1,而沙尘气溶胶主要是非球形的矿物质颗粒物,其退偏比相对较大,退偏比在 0.2 和 0.3 之间,卷云的退偏比在 0.5 左右.因此,偏振激光雷达正是通过探测不同高度处气溶胶后向散射光的退偏比,实现对球形与非球形气溶胶强度比探测,从而辨别气溶胶的形态和种类,为治理汽车尾气和工业废气等酸性球形颗粒物提供探测方法.

2 探测与分析

由式(4)可知,准确校正偏振激光雷达的标定因子是精确探测气溶胶退偏比的前提和基础.标定因

子主要受光路结构和光、电元件非一致性的影响. 实验中采用非偏光源法对该微脉冲偏振激光雷达的标定因子进行了校正. 在阴天的夜晚, 挡住激光雷达系统的出光口, 点亮位于望远镜接收视场内的白炽灯, 然后测量两路光通道的功率. 白炽灯属热致发光, 可视为非偏振光源. 对于完全非偏振光, 偏振分光棱镜所起的作用相当于分光比为 1 : 1 的分光棱镜. 此时 P 光和 S 光的功率比就是系统的标定因子, 经计算该微脉冲偏振激光雷达的标定因子为 0.97.

利用微脉冲偏振激光雷达系统在 2011 年 12 月对西安地区底层气溶胶进行了连续探测, 实验在夜间进行. 图 2 为 12 月 1 日, 微脉冲偏振激光雷达在 5° 仰角探测时不同距离处气溶胶的退偏比. 由图 2 可知, 在 5° 仰角的测量方向上气溶胶退偏比小于 0.1, 且随着距离增加, 退偏比逐渐减小, 这表明气溶胶的非球性随距离增加逐渐减小. 受几何因子影响, 系统在 50 m 探测距离内信噪比较低, 故在图 2 中未予体现. 值得一提的是, 在 600~800 m 的探测距离内(对应垂直高度 52~70 m), 回波信号强度较小, 信噪比偏低, 退偏比廓线有毛刺, 但这不影响退偏比的整体变化趋势.

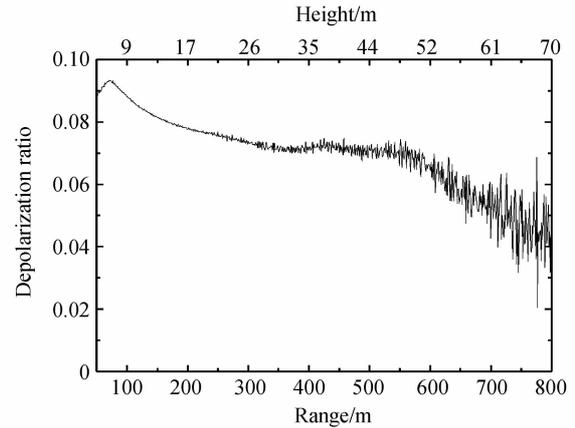


图 2 2011 年 12 月 1 日的实验结果
Fig. 2 Result of experiment in DEC. 1, 2011

通过俯仰扫描, 该微脉冲偏振激光雷达消除了几何因子对激光雷达近场测量的影响, 实现了底层气溶胶退偏比的有效探测. 实验期间西安夜间室外温度很低, 为了消除温度对激光器输出功率的影响, 实验在室内进行. 受实验室条件限制和周边建筑物的影响, 室内俯仰角度的扫描范围为 5°~30°. 扫描间隔 2°, 每条廓线的积分脉冲数为 5 000(即积分时间 5 s). 图 3 为 2012 年 12 月 1 日~12 月 16 日期间对西安地区底层气溶胶退偏比的俯仰扫描连续观测

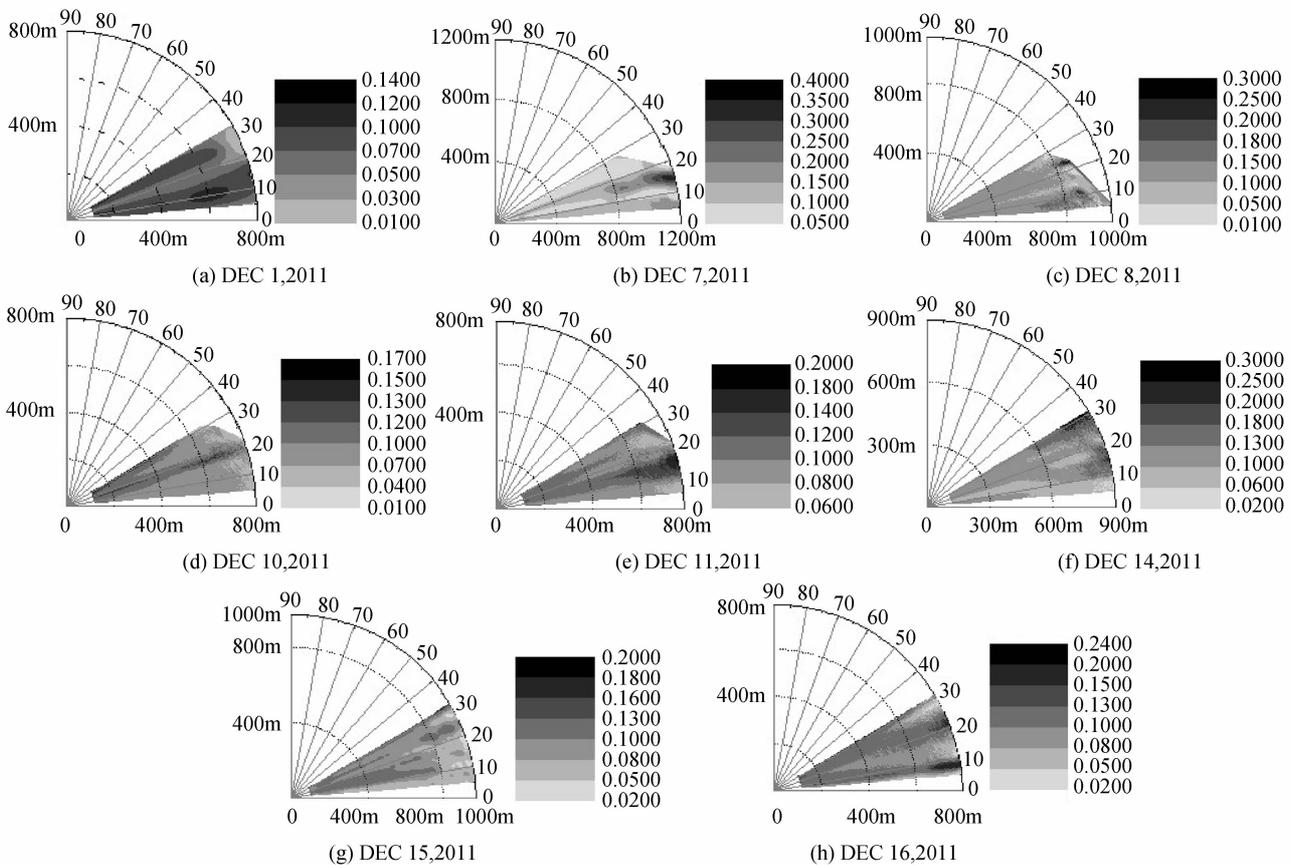


图 3 2011 年 12 月 1 日-12 月 16 日期间对西安地区底层气溶胶的退偏比的俯仰扫描连续观测
Fig. 3 Continuous observations with scanning in zenith angle for depolarization ratio of aerosols in Xi'an from December, 1-16, 2011

结果.

探测期间底层气溶胶的球形特性和分布情况与当时的天气过程和地面状况有着直接的关系. 由于12月2日~6日区间,西安地区有明显的连续降雨过程,所以图3(a)对应降雨前的一次测量,退偏比较小,表明气溶胶呈现较强的球形特性,这可能是由于在降雨之前空气湿度较大,废气排放和地面扬尘等各类气溶胶易形成凝结核,使得气溶胶的非球形整体降低.图3(b)和图3(c)分别对应降雨后1~2天内的测量,气溶胶退偏比增大,表明气溶胶整体呈现较强的非球形特性,这主要是由于天晴后大气中气溶胶颗粒含量的增强和人类活动的频繁,地面扬尘等非球形颗粒物逐步被带到天空中,使得气溶胶非球形特征增强.要说明的是,探测高度300 m以内局部区域气溶胶的退偏比值偏高,这类情况均发生在无绿化带的交通干道交叉口.

12月10日以后的探测结果表明,随着时间的推移,底层气溶胶的退偏比基本处于相同的范围内,在空间的分布也逐渐变得均匀,标志着底层气溶胶进入了一个相对稳定的状态.

3 结论

以西安理工大学激光雷达遥测研究中心为依托,自主研发了一台人眼安全可三维扫描功能的微脉冲偏振激光雷达系统,并利用该系统对冬季西安地区底层气溶胶的退偏比进行了连续扫描探测.实验结果表明,冬季西安地区底层气溶胶的退偏比在0.1左右,与天气过程有一定的关系,在探测期间无明显的沙尘天气,局部区域退偏比偏高的位置均发生在无绿化带的交通干道交叉口附近,验证了该偏振激光雷达系统实现底层气溶胶探测的可行性.研究成果可以对城市底层气溶胶的产生、传输及扩散特性的研究提供科学数据.

参考文献

- [1] MAO Jie-tai, ZHANG Jun-hua, WANG Mei-hua. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **60**(1): 625-634.
毛节泰,张军华,王美华. 中国大气气溶胶研究综述[J]. *气象学报*, 2002, **60**(1): 625-634.
- [2] ZHANG Xiao-ye. Aerosol over china and their climate effect [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, **22**(1): 12-16.
张小曳. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究[J]. *地球科学进展*, 2007, **22**(1): 12-16.
- [3] STONE S S. Observation by lidar of linear depolarization ratios for hydrometeors[J]. *Applied Meteorology*, 1971, **10**(5): 1011-1017.
- [4] PAL S R, CARSWELL A I. The polarization characteristics of lidar scattering from snow and ice crystals in the atmosphere [J]. *Applied Meteorology*, 1977, **16**: 70-79.
- [5] PAL S R, CARSWELL A I. Polarization properties of lidar scattering from clouds 347 nm and 694 nm [J]. *Applied Optics*, 1978, **17**(15): 2321-2328.
- [6] IWASAKA Y, HAYASHIDA S. The effects of the volcanic eruption of St. Helens on the properties of stratospheric aerosol: lidar measurement at nagoya [J]. *Meteorological Society of Japan*, 1981, **59**(4): 611-614.
- [7] SASSEN K, ZHAO Hong-jie, CODD G C. Simulated polarization diversity lidar returns from water and precipitating mixed phase clouds [J]. *Applied Optics*, 1992, **31**(15): 2914-2923.
- [8] SUGIMOTO N, UNO I, NISHIKAWA M, *et al.* Record heavy asian dust in beijing in 2002: observations and model analysis of recent events [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(12): 42-45.
- [9] LIU Dong, QI Fu-di, Jin Chua-jia, *et al.* Polarization lidar observations of cirrus clouds and asian dust aerosols over hefei [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, **27**(6): 1093-1100.
刘东,戚福弟,金传佳,等. 合肥上空卷云和沙尘气溶胶退偏比的激光雷达探测[J]. *大气科学*, 2003, **27**(6): 1093-1100.
- [10] DONG Xu-hui, QI Hui, REN Li-jun, *et al.* Application and data demonstration of lidar in sandstorm observation [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, **20**(2): 106-111.
董旭辉,祁辉,任立军,等. 偏振激光雷达在沙尘暴中的数据反演[J]. *环境科学研究*, 2007, **20**(2): 106-111.
- [11] ZHU Ai-chun, LIU Zhi-shen, LI Zhi-gang, *et al.* Research and experiments of polarization lidar system [J]. *Control and Automation*, 2008, **24**(1): 49-51.
朱爱春,刘智深,李志刚,等. 偏振激光雷达系统研制及实验测量[J]. *微计算机信息*, 2008, **24**(1): 49-51.

Detection of Bottom Aerosols in Urban Area using Micro-pulse Polarization Lidar

SONG Yue-hui, HUA Deng-xin, LI Shi-chun, WANG Yu-feng, DI Hui-ge, QIANG Li-hu

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: A portable micro-pulse polarization lidar system with 3D scanner at eye-safety level is developed, in which Nd : YAG pulsed laser is employed as the exciting source with 2 μ J pulse energy and 1 kHz repetition rate, to detect the spherical characteristics and distribution of bottom aerosols in urban area. To ensure high accuracy detection near the earth's surface at the range from 80 m to 1000 m in the region of high-density aerosols such as northwest region, analog photoelectric detection technique is adopted. Continuous observations with scanning in zenith angle are carried out for the first time for depolarization ratio of atmospheric aerosols below 1 km in Xi'an in winter, the results of depolarization ratio scanning profiles are obtained and the effect of weather process and state of ground on depolarization ratio is analyzed. The experimental results show that, the depolarization ratio is around 0.1, where there were no sandstorms during the observations, and the depolarization ratio in certain regions is relative higher, which are occurred at the crossings of roads without greenbelts. The experimental results validate the feasibility of the system and will also provide scientific data for investigating the generation, transmission and diffusion characteristics of urban pollution particles.

Key words: Aerosol; Depolarization ratio; Micro-pulse polarization lidar