

探测云和气溶胶的机载双波长偏振激光雷达

伯广宇 刘东* 王邦新 吴德成 钟志庆

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

摘要 针对机载双波长偏振激光雷达的技术特点, 结合搭载遥感飞机的基本性能, 分析了激光雷达的设计方法; 仿真计算了激光雷达的配置参数; 解决了激光雷达应用于航空平台的一些关键技术。通过实验取得了初步的结果, 地基实验表明, 激光雷达达到设计指标要求的探测能力。初步的飞行实验结果表明, 激光雷达采用的关键技术符合航空平台关于体积、重量、功耗以及环境适应性的要求。利用激光雷达的主动探测能力, 结合机上同时搭载的被动遥感仪器, 将实现国家关注的大气成分及其环境要素的科学实验研究目标。

关键词 大气光学; 航空遥感; 激光雷达; 云和气溶胶

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1014002

Two-Wavelength Polarization Airborne Lidar for Observation of Aerosol and Cloud

Bo Guangyu Liu Dong Wang Bangxin Wu Decheng Zhong Zhiqing

(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 two-wavelength polarization airborne lidar is designed for detecting three-dimensional distributions of aerosols and clouds and its interaction on both regional and global dimension. The design and operation of the lidar system are discussed. Simulation results of the lidar specifications are presented. Some key techniques adopted in developing the airborne lidar are depicted. The ground experimental result suggests that the lidar system can achieve the detection performance as wanted. Initial result from airborne measurement shows that the airborne lidar meets the aviation applications on weight, size, power and operating environment restrictions. In the future, integrated atmospheric observations using lidar along with other passive remote sensing instrument aboard on the aircraft, will improve our understanding of atmospheric composition and environment element.

Key words atmospheric optics; airborne remote sensing; lidar; cloud and aerosol

OCIS codes 010.0010; 010.3640; 010.1110

1 引言

云和气溶胶的辐射强迫效应以及云和气溶胶之间的相互作用, 是目前大气科学研究关注的两大热点^[1], 辐射强迫研究以及云和气溶胶之间的相互作用研究, 均对获取全球或区域尺度上云和气溶胶的时空分布有强烈的需求。为了满足这种在大空间尺度上观测云和气溶胶的需求, 人们已经建立了一些基于星载或地基的观测手段。其中基于星载平台的有采用主动探测技术的星载激光雷达(CALIPSO)^[2], 以

及采用被动探测技术的星载光谱辐射计。基于地基平台的有全球气溶胶太阳光度计自动观测网络(AERONET)^[3], 欧洲激光雷达观测网站(EARLINET)^[4], 亚洲激光雷达观测网站(AD-Net)^[5]等。

在现有的各种观测技术中, 激光雷达利用主动探测的技术优势, 可以获取云和气溶胶光学参数的廓线信息, 因而在云和气溶胶研究领域有独到之处。地基激光雷达探测气溶胶已有较多的研究报道, 然

收稿日期: 2012-05-03; 收到修改稿日期: 2012-06-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41075016)和国家 973 计划(2011CB403400)资助课题。

作者简介: 伯广宇(1980—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: boguangyu@sohu.com

* 通信联系人。E-mail: dliu@aiofm.ac.cn

而单台地基激光雷达,只能反映小范围内的气溶胶时空分布。组建地基激光雷达网,则可以满足在大空间尺度上观测气溶胶的需求,然而组网运行的各台激光雷达之间,必须解决探测方法以及数据处理方法的一致性和可比性问题。鉴于激光雷达组网技术的复杂性,搭载于星载或机载等移动平台上的激光雷达,是获取全球及区域尺度上云和气溶胶分布最有效的手段。以 CALIPSO 星载激光雷达为代表,其全球尺度上的探测能力,成为研究云和气溶胶及其相互作用的有力手段^[6]。而机载激光雷达针对云和气溶胶相互作用、污染区域、沙尘传输路径以及大气环境突发事件等热点问题进行探测,可以解决星载激光雷达信噪比偏低的问题,获得更高精度的探测数据,从而成为星载激光雷达的有效补充。机载激光雷达还可以作为星载大气探测设备的技术验证和数据对比平台。针对机载大气探测激光雷达的优势,国外已经研制了若干类型的机载激光雷达,已经有使用机载激光雷达探测云和气溶胶时空分布^[7~9]及其相互作用的报道^[10],相关报道证明,机载激光雷达也是一种研究云和气溶胶及其相互作用的有效手段。

机载激光雷达探测云和气溶胶的空间分布以及云和气溶胶相互作用,均要求较高的空间分辨率,从而实现捕捉云和气溶胶快速的时空变化以及云和气溶胶相互作用过程的目的。本文针对上述技术要求,结合激光雷达搭载的遥感飞机的性能,分析机载双波长偏振激光雷达的设计方案。通过地面实验,对激光雷达进行了性能测试,地面实验结果显示,激光雷达具备超过 10 km 的测程。针对航空应用背景下激光雷达所采用的关键技术,在研制过程中进行了初步飞行实验,结果显示,关键部件满足航空平台的环境适应性要求。

2 机载激光雷达系统设计

2.1 机载激光雷达设计方案

“环境大气成份探测分系统”要求机载激光雷达针对以下 4 个方面的科学问题具备相应的探测能力:1) 探测云和气溶胶的三维空间结构及分布,以及气溶胶光学厚度的分布;2) 获取高空间分辨率的气溶胶消光系数垂直廓线,为分系统内的痕量气体等被动遥感仪器的数据反演提供信息;3) 利用退偏振信息鉴别云的形态以及沙尘气溶胶;4) 为云和气溶胶相互作用研究提供基础数据。

用于探测气溶胶的激光雷达主要有:米散射技

术、拉曼技术和高光谱分辨率技术三种。拉曼激光雷达利用氮分子振动拉曼信号反演气溶胶消光系数,由于氮分子拉曼信号通常较气溶胶米散射信号弱 3~4 个数量级,拉曼信号需要长时间的累积才能获得足够的信噪比,用在快速移动的空基平台上,会导致数据水平分辨率偏低,因而拉曼方法不适合机载平台。高光谱分辨率激光雷达具备定量探测气溶胶光学参数的能力,但其高光谱滤光单元所采用的碘吸收池^[11]或者法布里-珀罗干涉仪^[12]等技术较为复杂,应用在航空平台有一定的技术风险性。综上所述,机载激光雷达采用成熟的米散射技术。激光雷达的发射波长越多、探测方法越丰富,可以获取的信息量越大,但是在航空应用的背景下,还需要考虑技术的复杂性、体积、重量以及功耗。综合考虑,机载激光雷达采用双波长偏振方案,同时获取两波长气溶胶光学参数,以及粒子的退偏振特性,可以实现云和气溶胶空间分布和光学参数的探测,并且可以为云和气溶胶的相互作用提供研究的基础数据。

目前全固态 Nd:YAG 激光器已经相当成熟,输出波长有基频 1064 nm、二倍频 532 nm 和三倍频 355 nm 等。考虑到 1064 nm 波长对卷云中的冰晶、沙尘气溶胶等尺度较大的粒子较为敏感,因而 1064 nm 波长较 355 nm 波长更适合卷云、沙尘传输以及云和气溶胶相互作用的探测。另一方面,相对于 355~532 nm 波段而言,532~1064 nm 有更大的波长间隔,更适用于研究气溶胶粒子 Angstrom 波长指数特征。综合考虑,机载激光雷达的发射波长为 532 nm 和 1064 nm,三个接收通道分别为 1064 nm 和 532 nm 垂直分量、平行分量通道,其中 532 nm 垂直和平行通道可以实现粒子的退偏振特性探测,通过粒子的退偏振特性,可以研究卷云和沙尘气溶胶等非球形粒子的形态^[13]。

2.2 机载激光雷达参数的仿真研究

激光雷达的搭载平台为双引擎喷气式遥感飞机,作业飞行高度为 10 km,作业飞行速度为 200 m/s。为了实现云和气溶胶空间分布的精细探测,机载激光雷达应当具备较高的水平和垂直空间分辨率;尤其针对云和气溶胶相互作用研究,气溶胶光学特性过渡区宽度只有数千米至数十千米的特点,数据的空间分辨率越高,捕捉的过渡区内的气溶胶光学特性变化过程越完整。综上所述,设计指标要求机载激光雷达水平分辨应达到 400 m,垂直分辨率应达到 7.5 m,测程为 10 km 高度至地面。针对机载激光雷达的设计指标;根据米散射激光雷达方程;使用合

适的气溶胶消光模式^[14]；根据大气辐射传输模式计算激光雷达接收的天空背景光；对机载激光雷达的主要配置参数进行了仿真计算。激光雷达仿真参数如表 1 所示。

表 1 激光雷达仿真参数

Table 1 Lidar system parameters for simulation

Parameter	Value
Laser wavelength	532 nm, 1064 nm
Laser energy(pulse)	100 mJ at 532 nm, 100 mJ at 1064 nm
Laser repetition frequency	20 Hz
Filter bandwidth	0.3 nm(532 nm), 0.5 nm(1064 nm)
Spatial resolution	7.5 m(vertical), 400 m(horizontal)
Telescope	200 mm(aperture), 1 mrad(field of view)
Detector	PMT(532 nm), APD(1064 nm)
Sampling resolution	12 bit(A/D)

取飞机的最大作业飞行速度为 200 m/s, 激光雷达重复频率为 20 Hz, 针对 400 m 的数据水平分辨

率, 取 40 发(2 s×20 Hz)激光脉冲累积仿真计算信噪比。图 1 给出了激光雷达白天探测和夜间探测的信噪比, 以及回波信号的仿真结果, 其中横坐标为信噪比(SNR), 纵坐标为激光雷达从 10 km 飞行高度开始向下探测的测程, 其中 0 代表地面所在位置。从图 1(a)和(b)可以看到, 无论是白天还是夜晚探测(白天较强的天空背景光会引起信噪比下降), 整个测程内两波长信号的信噪比都比较高, 即使在近地面, 两波长的信噪比均在 20 以上, 满足数据反演对信噪比的要求。

图 1(c)所示, 从 10 km 高度到地面范围内, 机载激光雷达的回波信号动态范围为 5~6 个量级, 结合激光雷达几何因子对近场强信号的抑制, 如果在距离接收望远镜 1 km 处实现信号的全接收, 则信号的动态范围可以压缩至 3 个量级。现有的光电倍增管(PMT)和雪崩二极管(APD)探测器拥有 5 个量级的动态范围, 可以实现机载激光雷达回波信号的探测。综上所述, 使用表 1 中所列的配置参数, 机载激光雷达可以实现 10 km 大气气溶胶的测程。

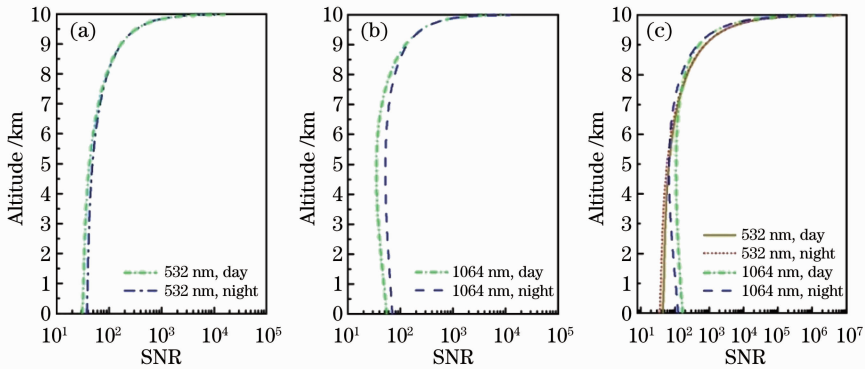


图 1 (a) 532 nm 信号仿真信噪比; (b) 1064 nm 信号仿真信噪比; (c) 两波长仿真回波信号

Fig. 1 (a) 532 nm simulated SNR; (b) 1064 nm simulated SNR; (c) simulated echo signal of two wavelengths

2.3 机载激光雷达关键技术和结构设计

机载激光雷达的设计过程中, 主要需要解决 3 个方面的关键技术: 1) 激光雷达机上收发光路准直、窄光谱和窄视场光学接收, 以及高灵敏度信号探测等关键技术; 2) 激光雷达应用于航空平台, 需要解决体积、功耗、重量的限制; 3) 激光对地面人眼的安全性以及激光雷达航空环境适应性及电磁兼容的要求。

激光雷达工作于天底模式, 其结构框图如图 2(a)所示, 激光器重复频率为 20 Hz。考虑到激光对地面人眼的安全性, 激光束的发散角不宜压缩的过小, 激光经 3 倍扩束镜后, 将发散角压缩至 0.5 mrad, 入射到飞机下方的大气中。为了减弱云层粒子多次

散射对信号接收的影响, 望远镜接收视场取 1 mrad。回波信号经分光镜使 532 nm 和 1064 nm 光信号分离, 1064 nm 光信号被 APD 接收, 532 nm 信号经检偏棱镜后, 分为垂直和平行通道, 分别由 PMT 接收。光电转换后的电信号由瞬态记录仪采集后, 交工控机处理, 数据采集每 10 发激光脉冲累积保存一组文件, 垂直分辨率为 7.5 m。数据反演时可以将连续 4 组文件累加在一起, 相当于 40 发激光脉冲累积, 当飞行速度为 200 m/s 时, 对应的数据水平分辨率为 400 m; 也可以根据实际信噪比的状况, 适当提高数据反演的水平分辨率, 取单组文件反演时, 水平分辨率为 100 m。“环境大气成份探测分系统”通过分系统主控管理器, 实现分系统内激光雷达和其他

仪器的工作时序、数据传输和状态监控的管理;激光雷达也可以独立于分系统单独工作。

图 2(b)给出了机载激光雷达的模装图,激光雷达的发射、接收和准直光路安装在光学柜中,瞬态记录仪和工控机等部件安装在控制柜中。机载激光雷达的结构设计按照航空标准关于环境适应性的要求

进行,并通过航空标准所规定的环境测试。考虑到飞行安全以及机上同时搭载多种光学和电磁波段的遥感仪器,机载激光雷达的电磁兼容设计,按照国军标电磁发射和敏感度的要求进行^[15],并通过相关测试实验。

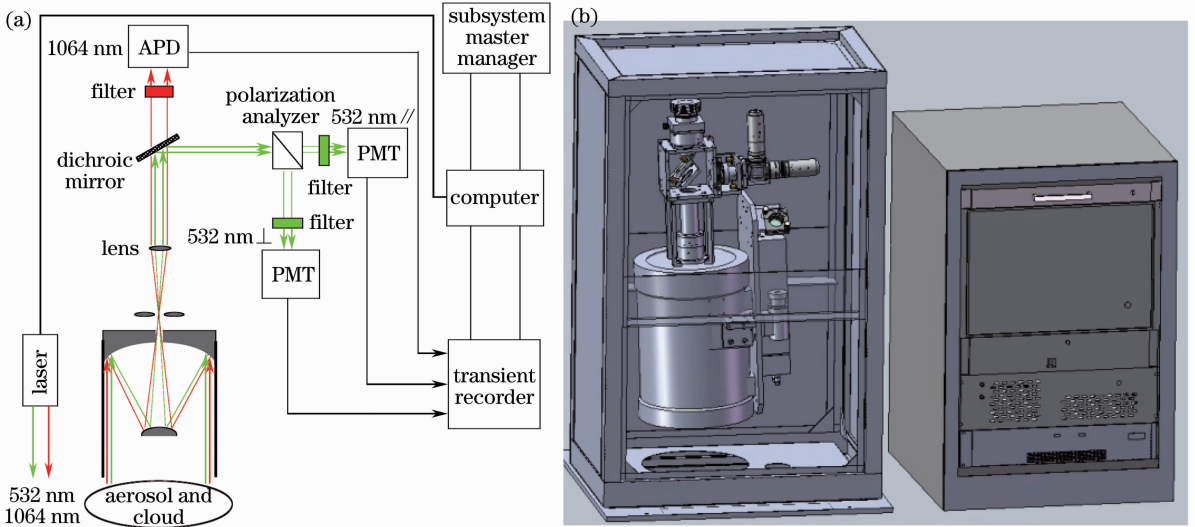


图 2 (a)机载激光雷达结构框图;(b)机载激光雷达模装图

Fig. 2 (a) Schematic diagram of airborne lidar; (b) assembly diagram of airborne lidar

3 机载激光雷达性能测试

3.1 机载激光雷达初步飞行实验

为了检验激光雷达采用的关键部件和结构设计,能否达到航空环境适应性的要求,机载激光雷达在研制的过程中,借助一次大气参数综合遥感实验,于 2011 年 7 月 9 日在天津周边进行了飞行实验,激光雷达将为本次大气遥感实验提供实验区内 532 nm 波长气溶胶光学厚度。飞机平台为国产运-12 小型飞机,作业飞行高度约为 4100 m,飞行速度为 220 km/h,当天实验区晴朗无云。飞机到达指定

高度后激光雷达开始作业,作业时间近 1 h,完成了对实验区内气溶胶空间分布的探测。飞行试验显示,激光雷达关键部件、光机和电子学单元工作稳定。图 3 给出了激光雷达探测的 3 组 532 nm 回波信号,每组信号为 10 发激光脉冲累加,横坐标为信号强度,纵坐标为测程(0 高度代表地面),地面高度上突起的尖峰信号为地面反射回波。

图 3(a)17 时 10 分、图 3(c)17 时 30 分探测的两组信号均显示,约 1.5 km 以下高度存在气溶胶积聚层,而图 3(b)17 时 20 分探测的大气则较清洁。使用

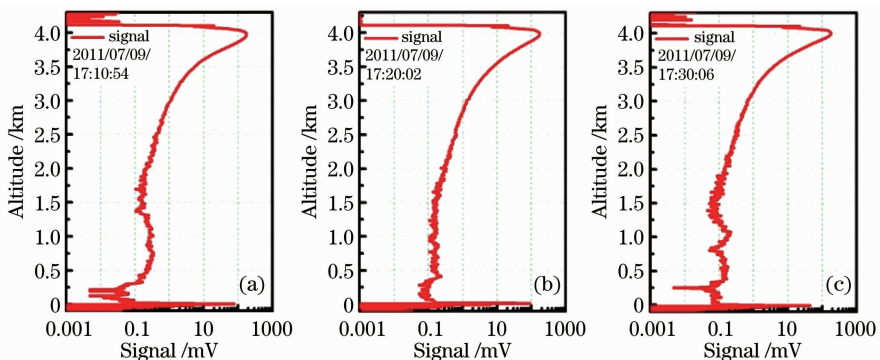


图 3 飞行试验获取的三组 532 nm 回波信号

Fig. 3 532 nm echo signal detected by airborne lidar

Fernald 方法反演气溶胶消光系数^[16,17], 532 nm 激光雷达比取 $50 \text{ sr}^{[17]}$, 分子的消光系数取自美国标准大气模式, 对 $0\sim 3 \text{ km}$ 高度的消光系数积分获得气溶

胶光学厚度, 如图 4 所示, 横坐标为飞行时刻, 纵坐标为光学厚度(AOD), 图中可见航线上 $0\sim 3 \text{ km}$ 高度区间的气溶胶光学厚度在 $0.1\sim 0.3$ 之间变化。

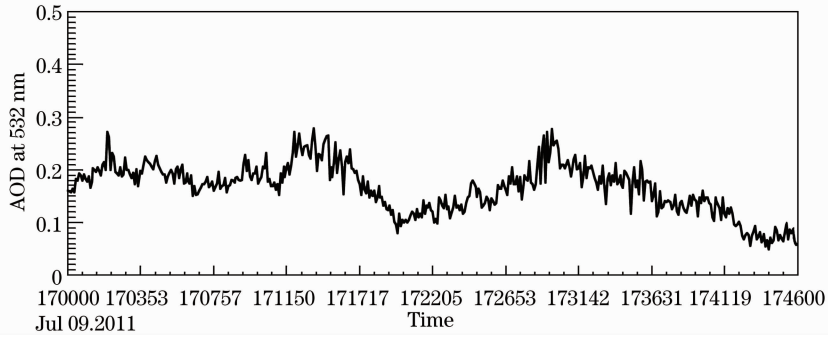


图 4 机载激光雷达探测的 532 nm 气溶胶光学厚度

Fig. 4 532 nm atmospheric optical depth measured by airborne lidar

3.2 机载激光雷达地面测试

机载激光雷达整机调试完毕后, 利用地面实验对 3 个通道探测指标进行了检验。针对云和气溶胶的探测, 要求激光雷达在有薄云或浓度较大的气溶胶层存在的大气状况下, 仍然具备一定的探测能力。为了验证机载激光雷达在上述条件下的探测能力, 有针对性的选择有云天气进行地面试验。图 5(a) 给了 2012 年 4 月 1 日 21:00 探测的 532 nm 平行、532 nm 垂直以及 1064 nm 三个通道回波信号, 横坐标为信号强度, 纵坐标为探测高度。由于气溶胶浓度随高度上升成指数衰减, 近地面高浓度的气溶胶对激光有强烈的衰减作用, 使得激光雷达地基探测相对于空基探测更为困难, 因而地基试验信号取 1000 发脉冲累积。图 5(a) 可见, $2\sim 4 \text{ km}$ 和 $6\sim 7 \text{ km}$ 高度出现了两层气溶胶层, 11 km 和 13 km 高度出现了薄云。激光穿透云层后, 532 nm 平行和垂直通道的信噪比, 在 15 km 高度上依然超过 10。实

验结果也反映出, 1064 nm 通道也具备 10 km 的测程, 但其信噪比要低于 532 nm 通道。图 5(b) 给出了利用 532 nm 平行和垂直通道反演的云和气溶胶的退偏振比, 横坐标为粒子的退偏振比, 可以看到 $2\sim 4 \text{ km}$ 和 $6\sim 7 \text{ km}$ 高度上的气溶胶层, 以及 11 km 和 13 km 高度上的云层粒子退偏振特性的丰富结构, 其中 13 km 高度上的薄云退偏振比达到了 0.45, 符合典型的高卷云的退偏振比特征^[13]。

图 5(c) 给出了利用 Fernald 方法^[16]反演的 $0\sim 10 \text{ km}$ 高度上, 532 nm 和 1064 nm 的气溶胶后向散射系数廓线, 横坐标为后向散射系数, 纵坐标为探测高度 (0 代表激光雷达所在的地面高度)。数据反演时, 532 nm 激光雷达比取 50 sr , 1064 nm 激光雷达比取 $40 \text{ sr}^{[18]}$, 分子的后向散射系数取自美国标准大气模式, 其中 1 km 以下高度暂未校正激光雷达几何因子的影响。

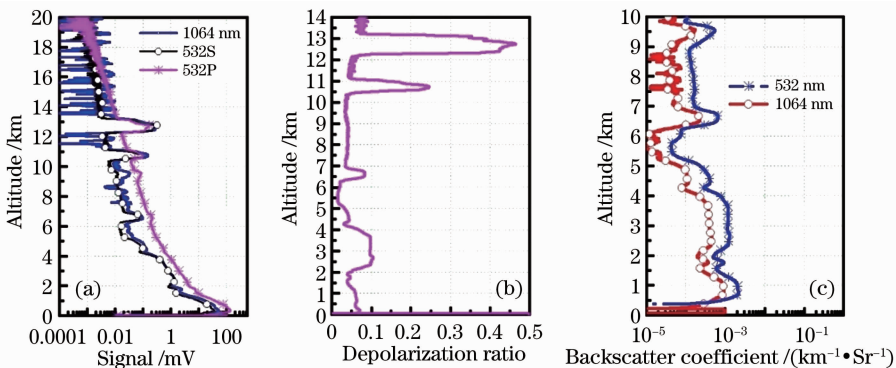


图 5 (a) 地面测量的三通道信号; (b) 532 nm 退偏振比; (c) 两波长后向散射系数

Fig. 5 (a) Three channel signal measured on the ground; (b) 532 nm depolarization ratio;

(c) 532 nm and 1064 nm backscatter coefficients

4 结 论

针对机载激光雷达探测云和气溶胶的技术要求,分析了激光雷达配置参数。针对激光雷达应用于航空平台的技术特点,对激光雷达的结构及电磁兼容进行了航空环境适应性设计。在研制过程中进行了初步的飞行实验。受制于小型飞机搭载平台的限制,飞行高度 4100 m,在 10 发脉冲累积的条件下,0~4 km 高度 532 nm 回波信号有较高的信噪比,反演获得了航线上 0~3 km 高度 532 nm 光学厚度的分布。激光雷达初步的飞行实验说明,激光雷达的关键部件、结构设计达到航空环境适应性的要求。待我国自己的高性能遥感飞机服役后,机载激光雷达仍需进行更深入的飞行实验,检验其空基探测性能。机载激光雷达的地基实验说明,在天空存在薄云的情况下,激光雷达也可以通过适当增加累积脉冲的方法,实现 0~10 km 高度范围内云和气溶胶的地基探测。

参 考 文 献

- 1 Duan Jing, Mao Jietai. Progress in researches on interaction between aerosol and cloud[J]. *Advance in Earth Science*, 2008, **23**(3): 252~260
段 婧, 毛节泰. 气溶胶与云相互作用的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2008, **23**(3): 252~260
- 2 D. Winker, M. Vaughan, B. Hunt *et al.*. The CALIPSO mission and initial results from CALIOP [C]. *SPIE*, 2006, **6409**: 640902
- 3 B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker *et al.*. Aeronet-a federal instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. *Remote Sensing Environment*, 1998, **66**(1): 1~16
- 4 V. Matthais, V. Freudenthaler, A. Amodeo *et al.*. Aerosol lidar intercomparison in the framework of the EARLINET project: 1. Instruments [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(4): 961~976
- 5 T. Murayama, N. Sugimoto, I. Uno *et al.*. Ground-based network observation of asian dust events of april 1998 in East Asia[J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(16): 18346~18359
- 6 J. Tackett, L. Girolarno. Enhanced aerosol backscatter adjacent to tropical trade wind clouds revealed by satellite-based lidar[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, **36**(14): 14804
- 7 F. Cyrille, P. Jacques, C. Patrick *et al.*. Airborne lidar

- measurements of aerosol spatial distribution and optical properties over the Atlantic Ocean during a European pollution outbreak of ACE-2[J]. *Tellus*, 2000, **52**(2): 662~677
- 8 M. McGill, D. Hlavka, W. Hart *et al.*. Cloud Physics Lidar: instrument description and initial measurement results[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(18): 3725~3734
 - 9 F. Dulac, P. Chazette. Airborne study of a multi-layer aerosol structure in the eastern Mediterranean observed with the airborne polarized lidar ALEX during a STAAARTE campaign (7 June 1997) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2003, **3**(5): 1817~1831
 - 10 W. Su, G. Schuster, N. Loeb *et al.*. Aerosol and cloud interaction observed from high spectral resolution lidar data[J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**(D24): 24202~24211
 - 11 Liu Jintao, Chen Weibiao, Song Xiaoquan. Theory of iodine filter based on high spectral resolution lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1548~1553
刘金涛, 陈卫标, 宋小全. 基于碘分子滤波器的高光谱分辨率激光雷达原理[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1548~1553
 - 12 Wang Guocheng, Sun Dongsong, Duan Lianfei *et al.*. Analysis and design of Fabry-Perot etalon of Doppler wind lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **38**(3): 2011, **31**(3): 0301001
王国成, 孙东松, 段连飞等. 测风激光雷达法布里-珀罗标准具参数及其性能分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0301001
 - 13 Liu Dong, Qi Fudi, Jin Chuanja *et al.*. Polarization lidar observations of cirrus clouds and asian dust aerosols over Hefei [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2003, **27**(6): 1093~1100
刘 东, 戚福弟, 金传佳等. 合肥地区卷云和沙尘气溶胶退偏正比的激光雷达探测[J]. *大气科学*, 2003, **27**(6): 1093~1100
 - 14 Y. Sasano, T. Kobayashi. Feasibility Study on Space Lidars for Measuring Global Atmospheric Environment [R]. No. 4 Final Report, NIES 1995. F-82
 - 15 技术标准: 中华人民共和国国家军用标准-军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求[S]. GJB151A-97, 北京: 国防科学技术工业委员会, 1997
 - 16 F. Fernald. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652~653
 - 17 Mao Minjuan, Zhang Yinchao, Fang Haitao *et al.*. Detection of aerosol distribution by atmospheric environment airborne lidar over Qingdao and adjacent sea area [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, **55**(2): 370~376
毛敏娟, 张寅超, 方海涛等. 机载激光雷达对青岛及周边海域的气溶胶探测[J]. *地球物理学报*, 2007, **55**(2): 370~376
 - 18 Zhou Jun, Yue Guming, Qi Fudi *et al.*. Optical properties of aerosol derived from lidar measurement [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, **15**(2): 140~148
周 军, 岳古明, 戚福弟等. 大气气溶胶光学特性激光雷达探测[J]. *量子电子学报*, 1998, **15**(2): 140~148