

车载式 1 064 nm 和 532 nm 双波长米散射激光雷达*

毛敏娟, 吴永华, 戚福弟, 范爱媛, 岳古明, 周 军

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 新近研制的车载式双波长米散射激光雷达可用于 1 064 nm 和 532 nm 两个波长对白天与夜晚对流层气溶胶消光系数垂直分布进行的探测。该激光雷达由激光发射单元、接收光学和后继光学单元、信号探测和采集单元以及系统运行控制单元组成, 后继光路之间采用光纤导光、高低层分层探测等关键技术。该激光雷达使用 1 064 nm 和 532 nm 的两个波长, 其单发脉冲能量分别为 400 和 300 mJ, 重复频率都为 20 Hz, 光束发散角小于 0.5 mrad; 望远镜接收视场为 1~3 mrad, 滤光片的中心波长为 1 064 nm 和 532 nm, 带宽 1 nm。分别使用 R3236 及 H7680 的 PMT 和 VT120 及 Phillips777 的放大器对两个波长的信号进行探测; 对 532 nm 波长用 3 A/D 采集卡、1 064 nm 波长用了光子计数卡。给出了双波长测量对流层气溶胶消光系数垂直分布的结果, 该激光雷达可以探测 $10^{-5} \sim 1$ 之间的消光系数, 探测高度可达 10 km 以上。

关键词: 双波长米散射激光雷达; 对流层; 气溶胶; 消光系数

中图分类号: TN958.89

文献标识码: A

大气气溶胶主要集中在对流层, 是激光大气传输、气候预测以及大气环境研究要考虑的一个重要的大气参数^[1]。受排放源、天气系统及局地气象条件等多种因素的影响, 不同地区、不同季节和不同高度上, 气溶胶的物理、化学特性尤其是光学性质有着显著的差异, 因此其时空分布较为复杂, 需要对其空间分布特征和时间演变规律进行长期系统地观测。

激光雷达是测量气溶胶光学性质时空分布的重要手段之一, 它具有较高的时空分辨率和测量精度, 是其它手段难以比拟的。近年来, 双波长米散射激光雷达的大气气溶胶探测技术受到激光雷达界的关注和青睐, 因为它不仅可以获得不同波长的气溶胶消光系数和气溶胶粒子的尺度特征^[2], 而且在反演气溶胶消光系数的方法上克服了单一波长处理时必须设立种种假定的不足^[3,4]。

目前, 双波长米散射激光雷达的大气气溶胶探测大多局限在边界层^[5], 或者在平流层^[6]。新近研制的车载式双波长米散射激光雷达 (Dual-wavelength Mie Lidar, 简称 DWL) 可用于不同地区 1 064 nm 和 532 nm 两个波长气溶胶光学性质的探测研究, 其探测范围从大气边界层至自由大气上部, 基本上覆盖了整个对流层。本文介绍了双波长米散射激光雷达的总体结构和技术参数, 详细地分析了各个单元的工作原理、结构和采用的关键技术, 并给出了它测量双波长对流层气溶胶消光系数垂直分布的结果。

1 总体结构、技术参数、各单元结构及关键技术

图 1 和表 1 分别给出了双波长米散射激光雷达的总体结构和主要技术参数。可以看出, 该激光雷达由激光发射单元、接收光学和后继光学单元、信号探测和采集单元以及系统运行控制单元组成。整个系统放置在长 1.2 m、宽 1 m 的光学平台上, 光学平台通过减震支架与车体底板连接。

1.1 激光发射单元

激光发射单元的功能是在接收望远镜进行俯仰运动时, 激光光束能与接收望远镜光轴保持等距且沿着与光轴平行的方向射入到大气中。激光发射单元包括 Nd:YAG 激光器和由 5 个反射镜组成的导光系统。

该激光雷达为一双轴系统, 近距离的大气回波信号要用几何重叠因子进行订正。几何重叠因子是通过激光雷达的水平大气探测获得的^[7]。为了保证双波长米散射激光雷达在水平与垂直两个方向的大气探测时几何重叠因子不变, 对其激光发射单元进行了独特的设计。Nd:YAG 激光器、反射镜 1 至 4 按图 1 所示的设置固定在光学平台上, 以保证它们之间结构的相对稳定性。反射镜 5 安装在接收望远镜俯仰转轴的侧壁上, 通过光

* 收稿日期: 2004-04-13; 修订日期: 2005-01-10

作者简介: 毛敏娟 (1972—), 女, 博士, 从事激光雷达大气探测的研究; 合肥中国科学技术大学东区 320-131; E-mail: mayammj@mail.ustc.edu.cn.

表 1 双波长米散射激光雷达的主要技术参数
Table 1 Specifications of the DWL

transmission unit		signal receiving and detecting unit	
laser	Nd:YAG	telescope	250 mm diameter, cassegrain
wavelength/nm	1 064 532	field of view	1~3 mrad
pulse energy/mJ	400 300	amplifier	VT120 (200,350 MHz) Phillips777 (40,200 MHz)
repetition rate/Hz	20	CWL of filter/nm	1 064 532
divergence/mrad	<0.5	filter bandwidth/nm	1 1
pulse width/ns	20 18	photon counter	MCS-Pci, 15 m accuracy

学装校,其镜面中心位于接收望远镜的俯仰转轴上,而由反射镜 4 反射的激光光束与接收望远镜的俯仰转轴重合,并通过反射镜 5 的镜面中心沿着与接收望远镜光轴平行的方向射入到大气中。在光学装校完成以后,整个导光系统采用管套密封。这样,在接收望远镜作俯仰运动时,发射的激光光束与接收望远镜的光轴之间保持等距和平行,也即激光雷达的几何重叠因子固定不变。

1.2 接收光学和后继光学单元

接收光学和后继光学单元的功能是将来自各个距离上两个波长的大气后向散射光收集并导入到相应的光电探测器中。

接收望远镜的支撑架和后继光学单元都固定在光学平台上。接收望远镜与后继光学单元之间采用了光纤耦合。为了使 3 mrad 接收视场内的大气后向散射光全部进入光纤,选择的光纤直径为 $\phi 2\text{ mm}$,数值孔径达 0.37,且对 1 064 nm 和 532 nm 两个波长高透。这样的结构既能做到接收望远镜在水平与垂直指向时,其收集的大气后向散射光都能通过光纤导入到后继光学单元,又保证了后继光学单元与后面的信号探测单元整体结构的稳定性。

经过光纤输出准直器后的近似平行光进入到后继光学单元。模拟计算表明,在整个对流层范围内(地面至 15 km),1 064 nm 和 532 nm 两个波长大气回波信号的动态范围达 7 个数量级左右,而且近距离大气回波信号很强。通过采用合适的几何重叠因子和高低层分层探测技术来解决回波信号大动态范围的问题。因此,需对后继光学单元进行分色和分束处理。后继光学单元由分色/分束片、窄带干涉滤光片、衰减片和透镜组成,其结构布局如图 2 所示。

分色片 BS1 在 1 064 nm 波长高反(反射率 $R=90\%$),532 nm 波长高透;分色片 BS2 在 1 064 nm 波长全反($R>97\%$),532 nm 波长高透。这两块分色片分别将 1 064 nm 波长的大气后向散射光导入高低层探测的光电倍增管中。BS3 为分束片,对 532 nm 波长反射率为 10%、透射率为 90%,它将 532 nm 波长的大气后向散射光分别导入低高层探测的光电倍增管中。这样的后继光学单元不仅有效地解决了回波信号大动态范围的问题,而且实现了两个波长高低层大气的同时探测,从而实时地获得了 1 064 nm 和 532 nm 两个波长整个对流层大气气溶胶消光系数垂直分布廓线。

为了抑制白天探测时的天空背景光,在 4 个光电倍增管前均放置了相应波长的窄带干涉滤光片。为了防止近距离的强大气后向散射光可能会使光电倍增管饱和而引起的探测信号的失真,在探测低层大气的两个光电倍增管前面都安装了合适透射率的中性衰减片。由于探测 1 064 nm 波长的光电倍增管的光阴极面比较小

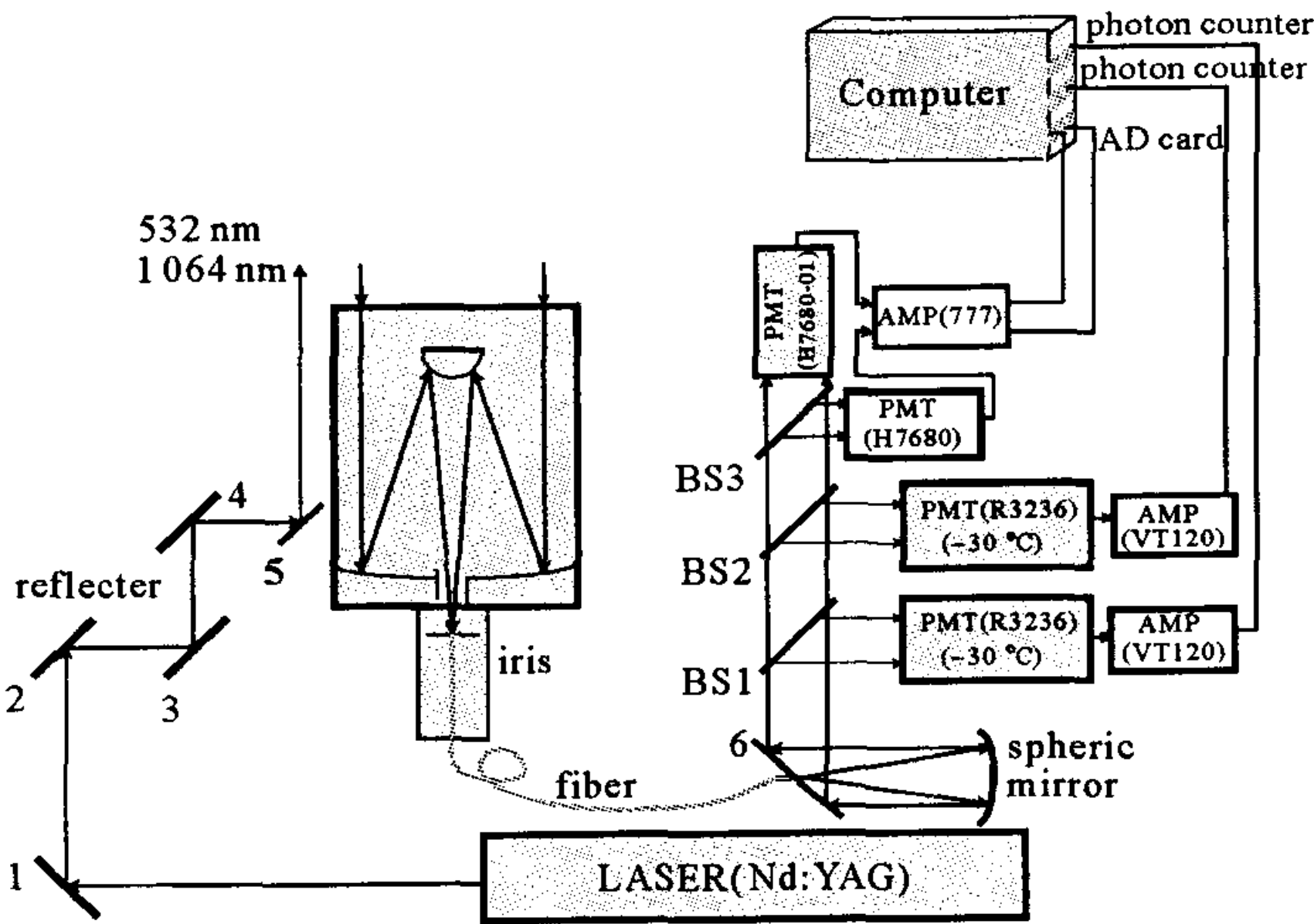


Fig. 1 Block diagram of the DWL
图 1 双波长米散射激光雷达的结构示意图

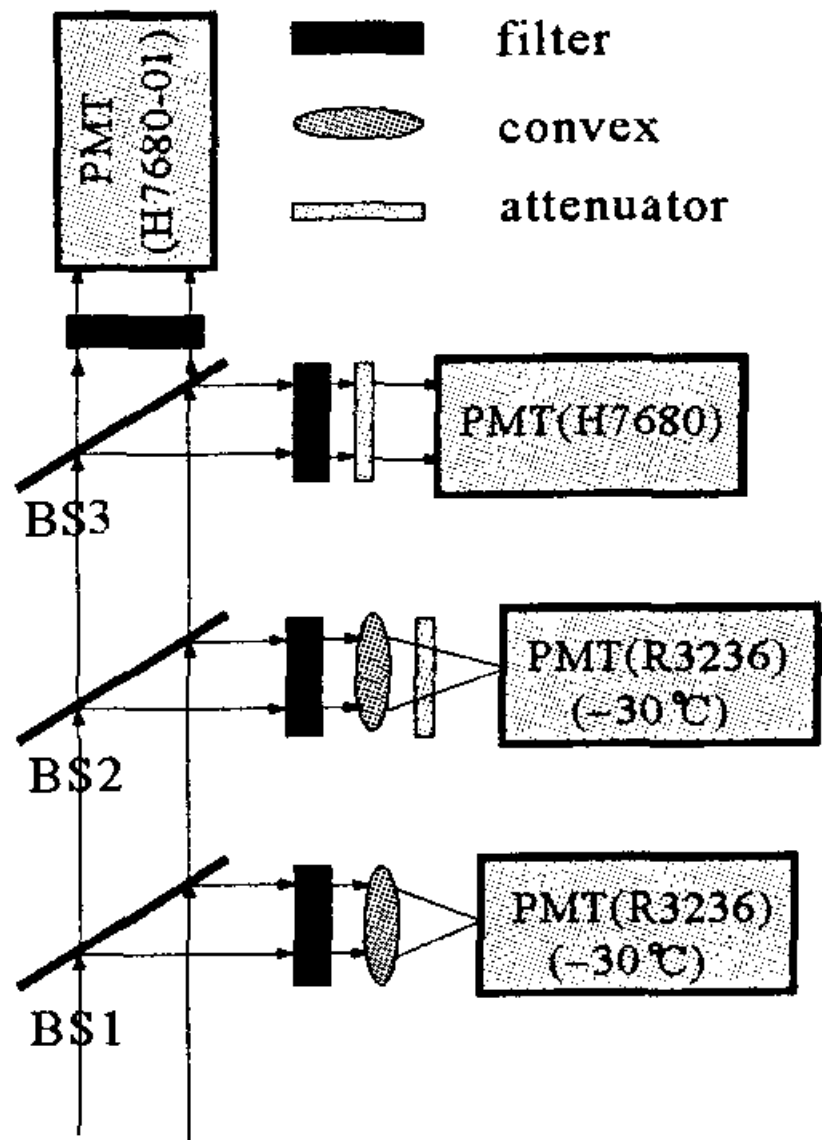


Fig. 2 Block diagram of subsequent optical unit
图 2 后继光学单元结构图

(直径 1 cm),在滤光片后面放置了短焦距的会聚透镜。

1.3 信号探测和采集单元

信号探测和采集单元的功能是对接收到的大气后向散射光进行光电转换、放大和采集,它主要包括光电探测器、放大器和采集器等。

1 064 nm 属于近红外波段,大气气溶胶在该波长的散射截面小,光电倍增管在该波长的量子效率低、暗噪声大。虽然雪崩二极管在该波长的量子效率比较高,可以达到 30%左右,由于它没有门控装置,无法进行高低层大气两个通道信号的同时探测,故探测高度受到限制。这样,对于 1 064 nm 波长,选用适合近红外波段、带有门控(常开型)且可用于光子计数的光电倍增管 R3236 进行大气回波信号的探测。为了减低暗计数,将 R3236 制冷到-30 ℃。使用适合弱信号采集的光子计数技术对探测信号进行采集。

大气气溶胶在 532 nm 波长的散射截面大,光电倍增管在该波长的量子效率高、暗噪声低,因此对于 532 nm 波长,选用室温工作、带有门控的模块化的光电倍增管 H7680/01 进行回波信号的探测,其中 H7680 为常开型,H7680-01 为常闭型。采用模数转换技术对探测信号进行采集。

1.4 运行控制单元

运行控制单元的功能是保证激光发射、大气回波信号的探测、数据采集、传输和存储协调一致地工作。它包括主波控制器、门控控制器、工控机和双波长激光雷达运行程序软件。

图 3 给出该激光雷达探测大气回波信号的工作时序。运行程序软件指令工控机发送一脉冲信号给门控控制器,门控控制器将其转变成两路脉冲信号,一路输入至用于 1 064 nm 波长高层大气探测的常开型 R3236 光电倍增管的门控电路,使其立即“关闭”。另一路输入至激光器氙灯外触发端口,点燃氙灯。接着,程序软件指令工控机通过串口发送命令给激光器使其出光。这样,在激光发射时刻,R3236 光电倍增管已经“关门”,即处于不工作状态。而探测 532 nm 波长高层大气的 H7680-01 光电倍增管本身就是常闭型,即一直处于“关门”的不工作状态。因此,激光发射以后,近距离处很强的大气后向散射光不会造成探测高层大气的两个光电倍增管深度饱和乃至损伤。

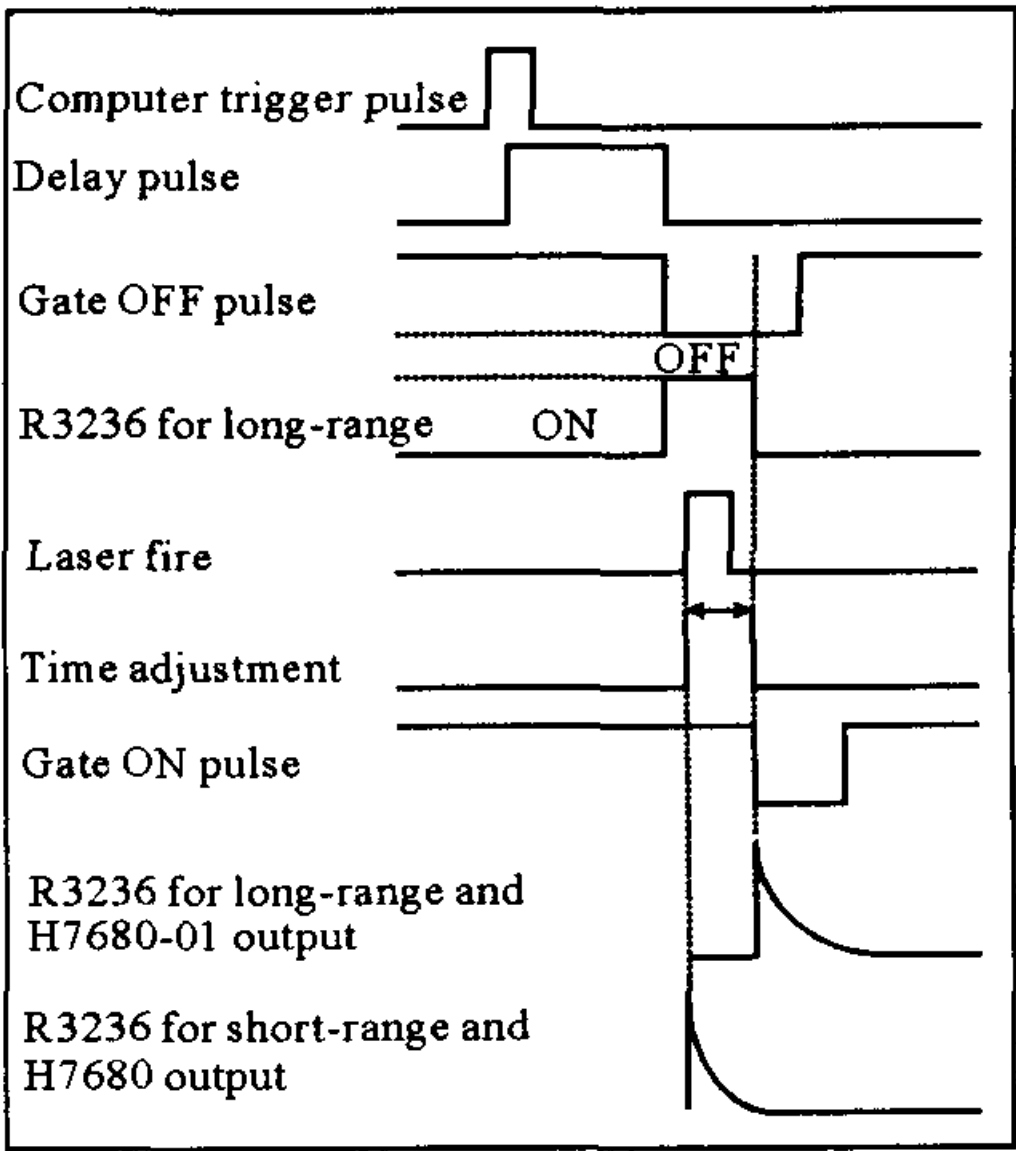


Fig. 3 Timing chart of the DWL
图 3 激光雷达的工作时序图

从图 1 中的高反镜 2 透过的 532 nm 波长的微弱激光入射到主波控制器后即产生激光主波信号,主波信号同时输入到 GAGE1610 A/D(10 MHz,16 bit)卡和 MCS-Pci 光子计数卡的触发端口,作为它们数据采集的零距离点。主波信号还输入给门控控制器,作为两个用于高层大气测量的光电倍增管“开门”时间的基准信号,调节门控控制器的“开门”时刻与主波信号之间的时间间隔,使当发射的激光在大气中传输到一定距离以后,这两个光电倍增管才“开门”,开始探测该距离以远较弱的大气后向散射光。而用于探测 1 064 nm 和 532 nm 波长低层大气回波信号的两个光电倍增管都为常开型,一旦激光发射到大气中,它们立即进行大气后向散射回波光的探测。4 个光电倍增管探测的大气回波信号分别经放大器放大和采集卡采集以后储存在工控机的硬盘内作为激光雷达的原始信号,待以后进行数据处理。

运行控制单元重复上述过程,直到完成运行程序软件预先设置的发射激光脉冲总数为止。

2 双波长米散射激光雷达的对流层大气气溶胶探测

该激光雷达与设在同一地区的日本国立环境研究所(NIES)双波长米散射激光雷达测量大气气溶胶相比较,结果如图 4 所示。可以看出,两台激光雷达探测的 1 064 nm 和 532 nm 两个波长气溶胶消光系数垂直廓线在 0.3 km 至 4.5 km 高度范围内基本符合,甚至气溶胶消光系数空间分布的微细结构也呈现了较好的一致性,这一高度范围消光系数主要介于 10⁻³到 1 之间。这说明了车载式双波长米散射激光雷达探测结果的可靠性。在 0.3 km 以下的差异是因为 NIES 的激光雷达没有对近距离大气回波信号进行几何重叠因子订正。由于 NIES 的激光雷达对每一个波长仅使用一个探测通道,其探测的气溶胶消光系数在 4.5 km 以上振荡比较大,尤其是 1 064 nm 波长更是如此,因此很难在 4.5 km 以上进行两台激光雷达探测结果的比较。

图 5 给出了 2003 年 10 月 6 日 15:00 该激光雷达探测的 1 064 nm 和 532 nm 两个波长对流层大气气溶胶消光系数的垂直廓线。可以看出,即使在天空背景光比较强烈的白天,该激光雷达对两个波长气溶胶消光系数的探测高度达到了对流层的上部,也即 10 km 以上高度。

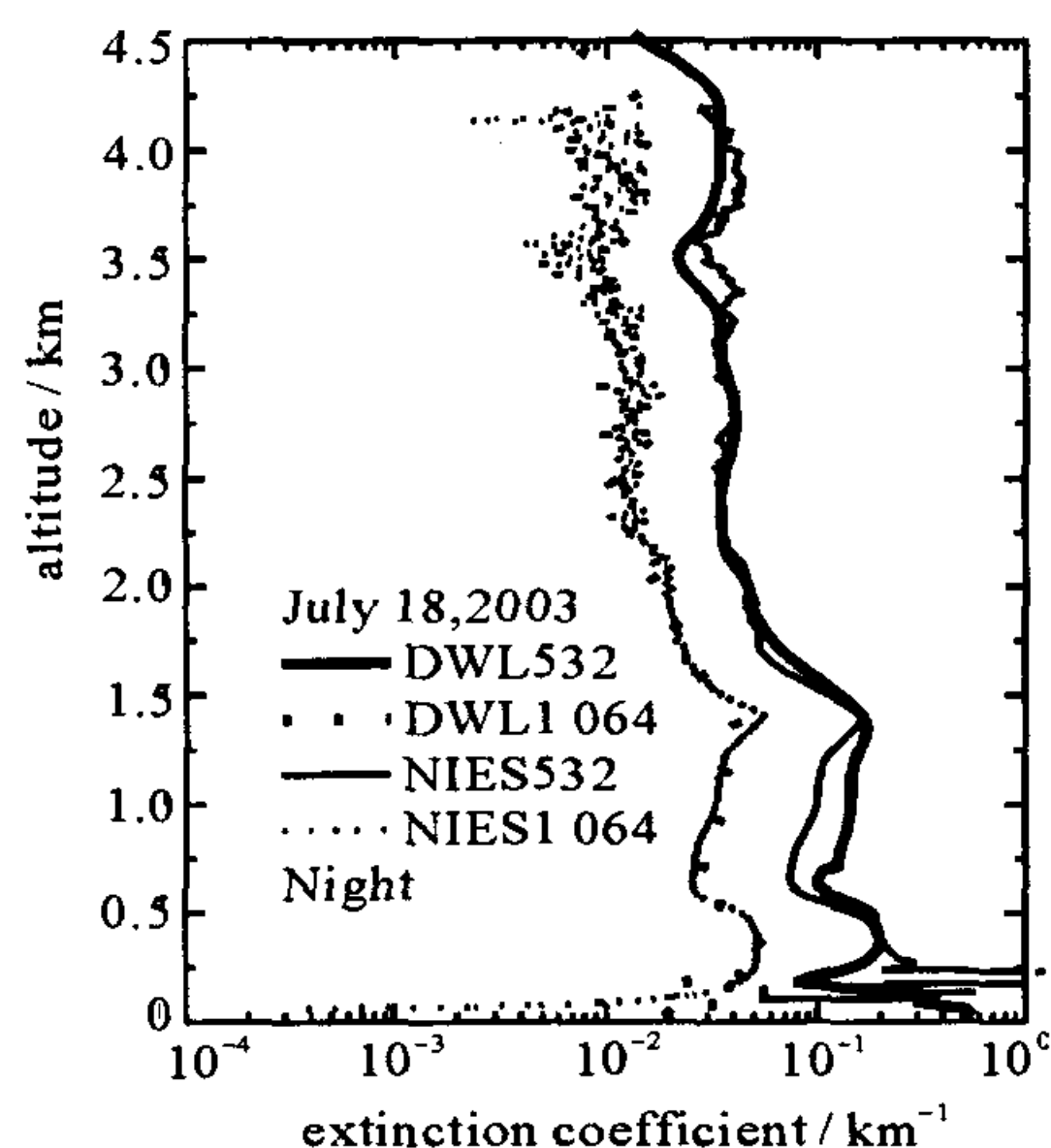


Fig. 4 Comparison results between DWL and NIES lidar

图 4 两台激光雷达探测气溶胶消光系数垂直廓线的比较

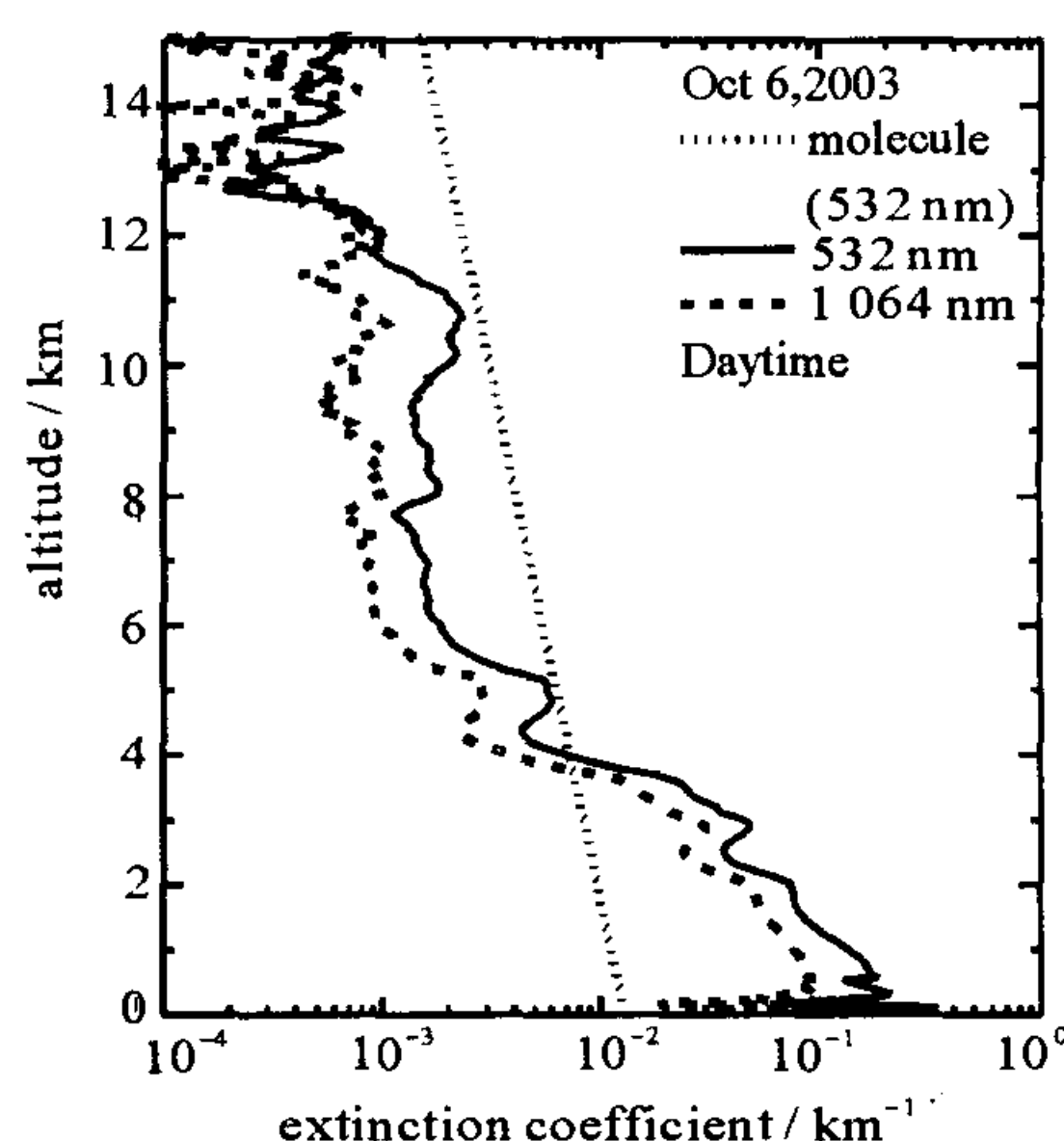


Fig. 5 Profiles of aerosol extinction by the DWL during daytime on Oct 6, 2003

图 5 2003 年 10 月 6 日白天两个波长气溶胶消光系数垂直廓线

3 结 论

车载式双波长米散射激光雷达具有结构紧凑、性能稳定和探测数据可靠的特点。无论是白天还是夜晚,它可以同时进行 1 064 nm 和 532 nm 波长对流层气溶胶消光系数垂直分布的探测,探测范围在 $10^{-5} \sim 1$,探测高度可达 10 km 以上。该激光雷达系统可用于不同地区对流层大气气溶胶消光系数垂直分布的常规探测中。

参考文献:

- [1] Tanre D, Devaux C, Herman M, et al. Radiative properties of desert aerosol by optical ground-based measurements at solar wavelengths[J]. *J Geophys Res*, 1988, **93**: 14223—14231.
- [2] Reid J S, Eck F, Christopher S A, et al. Use of the Angstrom exponent to estimate the variability of optical and physical properties of aging smoke particles in Brazil[J]. *J Geophys Res*, 1999, **104**(24): 31333—31349.
- [3] Ackermann J. Analytical solution of the two-frequency lidar inversion technique[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(36): 7414—7418.
- [4] Gimmetstad G G. Comment on two-wavelength lidar inversion techniques[J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(20): 2004—2009.
- [5] Iwasaka Y, Nagaya K, Okada K, et al. Lidar and airborne particle countermeasurements of aerosol size distribution in the lower atmosphere; a comparison[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1981, **60**(1): 562—569.
- [6] Di Girolamo P, Gagliardi R V, Pappalardo G, et al. Two-wavelength lidar analysis of stratospheric aerosol size distribution[J]. *J Aerosol Sci*, 1995, **26**(6): 989—1001.
- [7] Sang W D, Young J P, Hong J K. Experimental determination of a geometric form factor in a lidar equation or an inhomogeneous atmosphere[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**: 6009—6010.

Mobile dual-wavelength Mie lidar

MAO Min-juan, WU Yong-hua, QI Fu-di, FAN Ai-yuan, YUE Gu-ming, ZHOU Jun

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

Abstract: A mobile dual-wavelength Mie lidar(DWL) is introduced. The DWL can be used to measure the aerosol extinction coefficient profiles at 1 064 nm and 532 nm wavelength. The DWL system is composed of a transmission unit, a signal receiving unit, a signal acquiring unit and a processing control unit. Some main specifications of the DWL system are presented, which include laser with 1 064 & 532 nm wavelengths and 400 & 300 mJ pulse energy, 20 Hz repetition rate and less 0.5 mrad divergence, telescope with 1~3 mrad FOV, two different PMT R3236 & H7680 and two different amplifier VT120 & Phillips777 for 1 064& 532 nm signal detecting, filters with 1 064 & 532 nm center wavelength they have 1 nm bandwidth, even different data acquiring cards and so on. The fundamental principles and key techniques of each unit are explained. Preliminary observation shows that the DWL system is reliable to obtain vertical aerosols profiles of total troposphere, namely about 10 km in height, and to detect aerosols extinction coefficients of 10^{-5} to 1.

Key words: Dual-wavelength Mie lidar; Troposphere; Aerosol; Extinction coefficient