

探测对流层气溶胶的双波长米氏散射激光雷达

周 军 岳古明 金传佳 戚福第 易维宁 李 陶 陈毓红 熊黎明
(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘 要 研制了一台双波长米氏散射激光雷达, 用于 532 nm 和 1064 nm 两个波长对流层气溶胶消光系数垂直廓线的长期探测。介绍了该激光雷达的技术参数和总体结构, 叙述了各部分的结构和工作原理, 给出了合肥地区对流层气溶胶测量的若干典型结果。

关键词 激光雷达, 气溶胶, 对流层。

1 引 言

对流层气溶胶粒子通过吸收和散射太阳辐射以及地球的长波辐射而影响地球-大气系统的辐射收支, 它作为凝结核参与云的形成, 从而对局地、区域乃至全球的气候有着重要的影响。人类活动产生的气溶胶被认为是全球气候预测的研究中最不确定的因子之一^[1]。对流层气溶胶粒子对激光的吸收和散射作用使它成为激光大气传输的重要消光因子。因此, 进行对流层气溶胶光学特性的测量一直是气候、环境和大气科学等领域研究中十分关心的问题, 已为各国所重视。

激光雷达为对流层气溶胶探测提供了有力的工具。数十年来, 激光技术、信号探测和数据采集及其控制技术的发展使激光雷达在对流层气溶胶的探测高度、垂直跨度、空间分辨率、时间上的连续监测、测量精度等方面具有全面的优势, 是其它探测手段很难比拟的^[2, 3]。

我们建立了一台双波长米氏散射激光雷达, 用于探测 532 nm 和 1064 nm 两个波长对流层气溶胶消光系数的垂直廓线。本文介绍了该激光雷达的技术参数和总体结构, 叙述了各部分的结构和工作原理, 同时给出了中国合肥地区对流层气溶胶测量的若干典型结果。

2 双波长米氏散射激光雷达技术参数和总体结构

对流层气溶胶粒子的主要特点, 一是其浓度在近地面最大并随着高度的增加而减少, 尤其在从地面至 3 km 左右的高度范围内, 减少的速率最为剧烈, 在对流层顶附近达到最小值, 且浓度的垂直结构一般也较为复杂; 二是对流层气溶胶尺度谱的范围比较宽, 包含有各种粒径的粒子; 三是在对流层特别是其中下部, 气溶胶浓度往往每日之间存在较大的变化; 四是在中纬度地区, 对流层顶高度一般在 10 至 15 km 左右。因此, 对流层气溶胶粒子的这些特点要求激光雷达技术参数的确定和总体结构的设计必须满足接收信号的动态范围足够大, 至少

在 6 个数量级以上; 测量的空间分辨率要精细, 一般在几十米以内; 测量时间要短, 在 20 到 30 分钟以内; 测量的日子尽可能地多, 除云雨天气外, 最好每天都能进行探测; 为了获得气溶胶粒子尺度谱的信息, 以多波长探测为宜; 探测高度要达到 15 km 左右。

表 1 列出所研制的双波长米氏散射激光雷达的主要技术参数。图 1 给出其总体结构示意图。从中可以看出, 该激光雷达主要由双波长激光发射、方位和俯仰扫描、接收光学、信号接收和数据采集以及系统运行控制五个单元组成。

激光雷达的工作过程是在运行控制程序的指令下, 计算机以 10 Hz 的频率触发 Nd:YAG 激光器, 使其以同样的重复频率垂直向大气中发射 1064 nm 和 532 nm 两个波长的激光。对每一发激光, 从激光器谐振腔高反射镜后面透过的 1064 nm 激光被光电二极管(PD)接收,

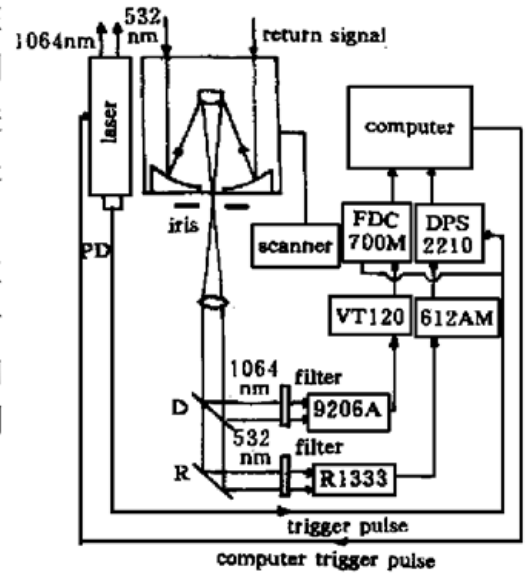


Fig. 1 Schematic diagram of the Mie lidar system

Table 1. Specification of the Mie lidar

laser	Nd:YAG	
wavelength/nm	532	1064
output energy/pulse/mJ	70	150
repetition rate/Hz	10	10
beam divergence/mrad	1	1
pulse duration/ns	20	20
scanner	elevation 0°~ 90°, Azimuth 0°~ 360°	
receiving optics	Cassegrain telescope	
type	Cassegrain telescope	
diameter/mm	300	
field of view/mrad	1~ 4	
central wavelength of filter/nm	532	1064
bandwidth/nm	1	1
transmittance/%	50	40
signal receiver		
PMT	Hamamatsu R1333	EM19206A
gate type	C1392	GBIB
amplifier	LeCroy 612AM	VT120
gain	40	200
bandwidth/MHz	140	350
data acquisition		
type	DSP 2210/516	FDC-700M
sample rate/ns	200	400
accuracy	12-bit	700 MHz
data processing	Pentium 586 computer	

光电转换后的电脉冲信号被用作主波分别触发 DSP2210 瞬态记录仪和 FDC-700 光子计数器，使它们开始采集。两个波长的大气后向散射光被接收望远镜接收、经分色镜 D 分成 1064 nm 和 532 nm 两个通道。1064 nm 光的后向散射光被 9206A 光电倍增管接收、电信号经 VT120 放大后由 FDC-700M 光子计数器采集。532 nm 后向散射光被 R1333 光电倍增管接收、电信号经 612AM 放大后由 DSP2210 瞬态记录仪采集。两个通道采集的数据分别送入计算机内储存。对下一发激光，激光雷达重复上述过程，这样循环下去，直到激光器发射完运行控制程序内设定的激光脉冲数为止。

3 双波长米氏散射激光雷达各单元结构和工作原理

3.1 双波长激光发射系统

激光雷达的双波长激光发射系统包括单横模调 Q 的 Nd·YAG 激光器和激光光束方向调整单元。激光器由振荡器和一级放大器组成。二倍频晶体是 BBO，其两个通光面的平行度小于 10 秒，保证了 1064 nm 和 532 nm 两个波长激光的同轴发射。由两块平面反射镜构成的激光光束方向调整单元用于调节激光的发射方向，使其和接收望远镜的光轴平行。整个激光发射系统安装在接收望远镜的上方，随接收望远镜一起作方位和俯仰扫描。

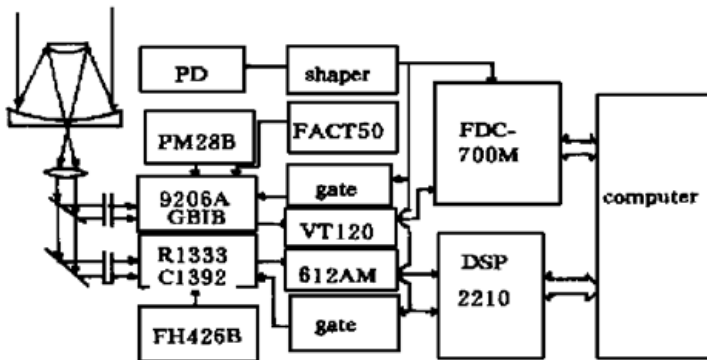
3.2 接收光学系统

如图 1 所示，接收光学系统由接收望远镜和后继光学单元组成。接收望远镜为卡塞格林型。主镜为抛物面，直径 300 mm；副镜为双曲面，直径 90 mm；组合焦距为 2.2 m。主、副镜都镀有铝膜层。在组合焦点处设置一可变直径的小孔光阑以调节接收望远镜的视场角在 1~ 4 mrad 之间。

后继光学单元由目镜、分色镜 D、反射镜 R、滤光片和衰减片组成。目镜由 K₉ 玻璃制成。其后的分色镜 D 镀有 1064 nm 全反射和 532 nm 高透射的介质膜层，反射镜 R 镀有 532 nm 全反射的介质膜层，它们将接收望远镜接收到的 1064 nm 和 532 nm 两个波长的激光回波分别导入探测相应波长的光电倍增管内。采用直插式方式，在每个光电倍增管前面都放置了相应的高光谱透过率的窄带干涉滤光片和中性衰减片，以有效地减小天空背景噪声，实现高层和低层的分段测量，满足接收回波信号的大动态范围的要求。

3.3 信号接收和数据采集系统

图 2 给出信号接收和数据采集系统的结构示意图。从图中可以看出，1064 nm 波长回波



信号的光子计数测量系统主要由带门控 GB1B 的 9206A 光电倍增管、PM28B 高压电源、FACT50 致冷器(- 30℃)、VT120 前置放大器、FDC-700M 光子计数器和计算机组成。532 nm 波长回波信号的模拟测量系统主要包括带门控 C1392 的 R1333 光电倍增管、FH426B 高压电源、612AM 前置放大器、DSP2210 瞬态记录仪和计算机。这两个测量系统在计算机内的激光雷

Fig. 2 Schematic diagram of the signal processing unit

达运行控制程序的指令下，各自完成 1064 nm 和 532 nm 两个波长大气后向散射回波信号的

接收、放大、数据采集、传输与存储。

3.4 运行控制系统

运行控制系统包括激光主波控制器、光电倍增管门控控制器、主控计算机及激光雷达运行程序软件。

如图 1 和图 2 中所示, 激光主波控制器由安装在激光器谐振腔高反射镜后面的光电二极管 PD 和整形器组成。光电二极管接收到从高反射镜透射出来的 1064 nm 激光, 光电转换后的电脉冲信号经整形器整形后即产生主波信号。主波是调节两个光电倍增管‘开门’的基准信号, 是提供 DSP 2210 型瞬态记录仪和 FDC-700M 型光子计数器采集的触发信号, 它给出了数据采集系统工作的零时刻, 即显示了激光雷达探测区域的零距离点。

在进行对流层高层气溶胶探测时, 门控控制器利用计算机发给 Nd:YAG 激光器工作的指令信号分别触发两个光电倍增管的门控 GB1B 和 C1392, 使光电倍增管第一打拿极相对于阴极为负电压, 从而阻挡了阴极发射的电子到达倍增极。光电倍增管处于‘关门’状态, 防止了近距离处很强的大气后向散射回波造成光电倍增管阴极表面深度饱和乃至损伤。然后, 门控控制器以发射激光的主波信号为起始时刻来调节光电倍增管的‘开门’时刻(即对应于某一高度), 使第一打拿极相对于阴极瞬间转为正电压, 阴极发射的光电子被吸引顺利到达第一打拿极并通过倍增器倍增, 光电倍增管输出了‘开门’高度以远的大气后向散射光的电信号。图 3 是激光雷达接收高层 532 nm 波长回波信号的工作时序图。

主控计算机内的激光雷达运行程序软件包括激光雷达系统工作参数的设置(如发射的激光脉冲总数、激光发射重复率、探测距离、空间分辨率)、采集数据的传输、存储、平均与绘图等。主控计算机在运行程序软件的指令下按照预先设置的工作参数使激光雷达自动完成激光发射、回波信号接收、数据采集、传送和存储。

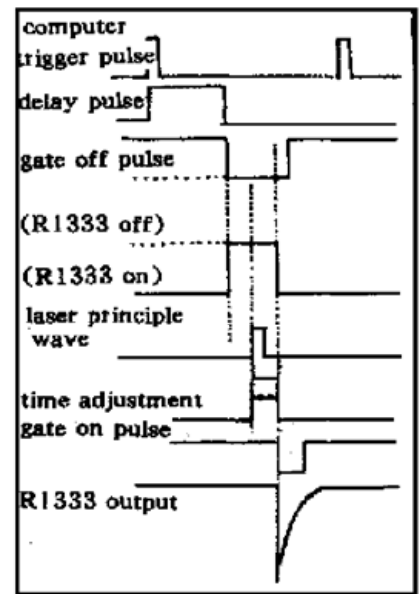


Fig. 3 Timing chart of received signal at 532 nm

4 测量和数据处理方法

测量于晴朗无云的夜晚进行。激光雷达呈垂直指向。整个测量分两个阶段进行。第一阶段测量高层大气的回波信号。Nd:YAG 激光器发射 15000 个左右的激光脉冲。R1333 门控设在 1.5 km 左右‘开门’, 9206A 门控设在 2 km 左右‘开门’。第二阶段撤去门控, 在两个光电倍增管前分别插入合适透过率的中性衰减片, Nd:YAG 激光器发射 10000 个左右的激光脉冲以进行低层双波长回波信号的测量。

对每一个激光波长测量的原始数据, 首先是扣除天空背景光、接收电子仪器的暗电流和热噪声等产生的背景信号; 其次, 由于在过渡区内激光光束仅仅一部分在接收望远镜的视场内, 故要对这部分激光光斑面积进行归一化的几何重叠因子修正^[4], 以保证回波信号的全接收; 然后将高、低层两条回波信号廓线拟合成一条完整的大气后向散射回波信号廓线; 最后使用 Fernald 方法进行反演可计算出每个波长气溶胶消光系数的垂直廓线^[5]。而从气溶胶消

光系数与波长的依赖关系可得到反映气溶胶尺度谱特征的埃斯屈朗(Angstrom)指数的垂直廓线^[6]。

图4为激光雷达在1999年1月3日晚20:00接收到的532 nm波长和1064 nm波长的大气后向散射回波信号廓线,图中的平滑曲线为回波信号数值模拟计算的结果。二者的一致性表明激光雷达接收的信号正确可信。它们在某些区域内的偏差是由于实际大气中气溶胶浓度的垂直结构毕竟与模式大气有所不同。

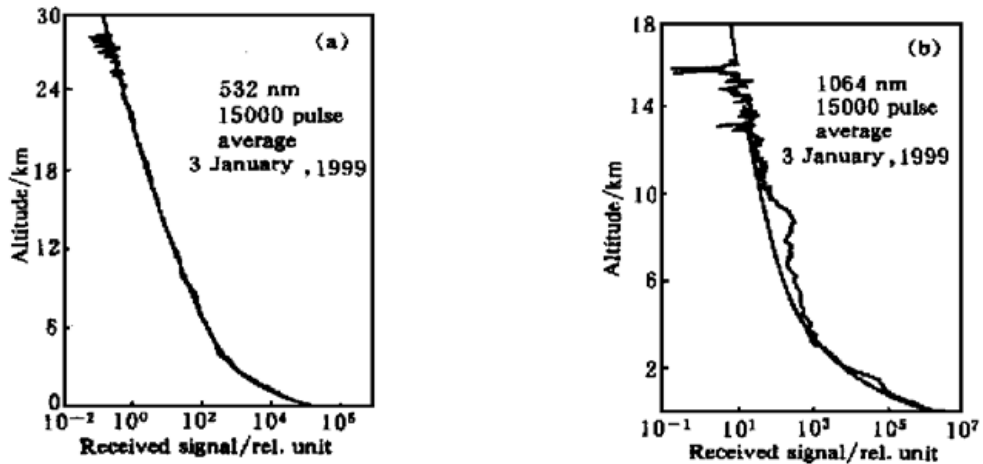


Fig. 4 Typical lidar received signals for 532 nm (a) and 1064 nm (b) at 20:00, 3 January, 1999. The smooth curves in the Figure are the simulation values

5 双波长米氏散射激光雷达测量对流层气溶胶的典型结果

图5给出了利用图4的数据得到的532 nm和1064 nm两个波长气溶胶消光系数的垂直廓线以及埃斯屈朗指数的垂直廓线。两个波长的消光廓线有着较为一致的变化趋势,甚至于细微的结构也基本相似。532 nm气溶胶消光系数较1064 nm的大,在不同的高度上两者之间的差值并不一样,这主要与气溶胶粒子尺度谱的垂直分布有关。埃斯屈朗指数在地面至6 km的高度范围内为1.0~2.0,6 km以上逐渐减小到0.5左右。由于埃斯屈朗指数通常在0与2之间,对于粒径较激光波长大的气溶胶粒子,埃斯屈朗指数小于1.0^[6]。因此,图5表明随着高度的增加,小尺度气溶胶粒子在总浓度中所占的权重愈来愈小。

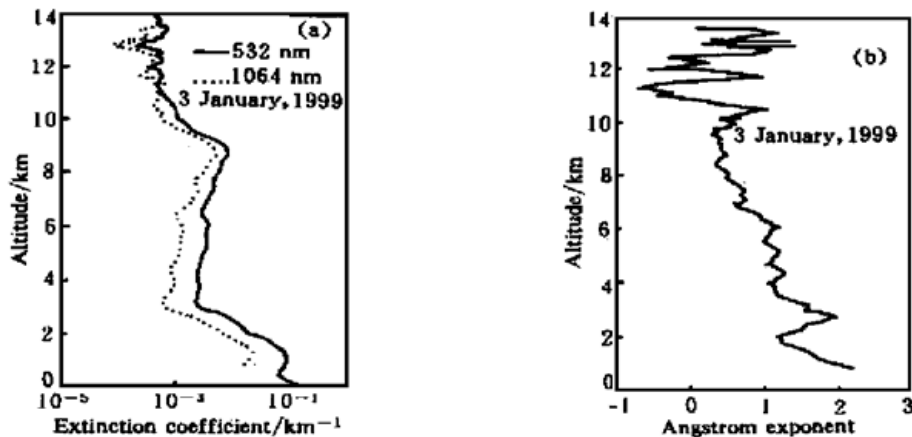


Fig. 5 Vertical profiles of aerosol extinction coefficients for 532 nm and 1064 nm wavelengths (a) and of Angstrom exponent (b) on 3 January, 1999

图 6 给出 1999 年 2 月 27 日、28 日和 3 月 4 日激光雷达探测的沙尘暴粒子在 532 nm 波长的消光廓线。该沙尘暴是伴随冷空气南下由北方侵入合肥上空的。作为比较, 图中也给出了空气分子瑞利散射消光廓线。从图中明显看出, 在 2 至 8 km 的高度范围内, 存在着沙尘暴粒子层, 造成那里的气溶胶消光系数明显增大。同时可以看出这几天气溶胶浓度都在 12 km 左右最低, 再往上, 气溶胶浓度较为稳定, 变化不大。

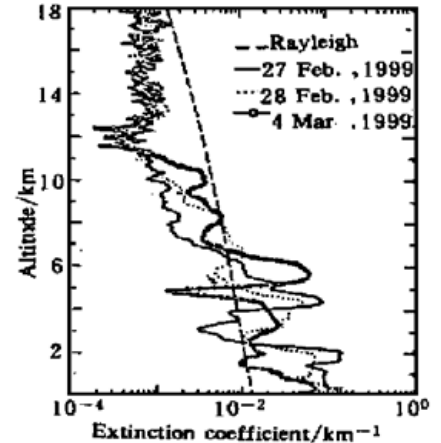


Fig. 6 Vertical profiles of Asian dust extinction coefficients for 532 nm on 27, 28 February and 4 March, 1999

结 论 介绍了自行研制的双波长米氏散射激光雷达的技术参数和总体结构, 系统地叙述了各个单元的结构和工作原理。该激光雷达已用于大气边界层、对流层气溶胶消光以及高卷云等空间结构和时间演变特征的常规探测。

参 考 文 献

- [1] Winker D M. Space lidar mission concept for climate studies, in proceedings of the European Symposium on *Aerospace Remote Sensing*, London, 1997. 22~ 26
- [2] Spinhirne J D. Micro pulse lidar. *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.*, 1993, **31**(1) : 48~ 54
- [3] Shimizu H *et al.*. Large scale laser radar for measuring aerosol distribution over a wide area. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(5) : 617~ 626
- [4] Tomine K, Hirayama C, Michimoto K. Experimental determination of crossover function in the laser radar equation for days with a light mist. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(12) : 2194~ 2195
- [5] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5) : 652~ 653
- [6] von der Gathen P. Aerosol extinction and backscatter profiles by means of a multiwavelength Raman lidar: a new method without a priori assumptions. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(3) : 463~ 466

Two-Wavelength Mie Lidar for Monitoring of Tropospheric Aerosol

Zhou Jun Yue Guming Jin Chuanjia Qi Fudi Yi Weining
Li Tao Chen Yuhong Xiong Liming

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

(Received 26 March 1999; revised 21 June 1999)

Abstract A two-wavelength Mie lidar was developed to measure the aerosol extinction coefficient profiles at 532 nm and 1064 nm wavelength in the troposphere. Specification and overall structure of the lidar are introduced. The structure and operation principle of its main subassemblies are presented. Some typical aerosol profiles over Hefei are shown and discussed.

Key words lidar, aerosol, troposphere.