

全天时多波长激光雷达系统研制与信噪比分析

赵 虎^{1,2} 华灯鑫¹ 狄慧鸽¹ 侯晓龙¹ 阎蕾洁¹ 毛建东²

¹西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

²北方民族大学电气信息工程学院, 宁夏 银川 750021

摘要 利用Nd:YAG激光器产生10 Hz的1064、532和355 nm激光束作为光源,研制了用于对流层大气气溶胶探测的全天时多波长激光雷达,实现了溶胶Mie散射信号在紫外、可见和红外三个波段的精细分离和提取。通过小孔光阑和窄带干涉滤光片对背景光的强烈抑制,实现了全天时探测。通过对三波长Mie散射信号日间和夜间探测信噪比数值仿真和实际探测信噪比分析,得出日间探测时532 nm的信噪比最低,夜间探测时355 nm的信噪比最低,这与数值仿真结果一致。通过分析实际探测信噪比为1时的数据,得到该系统日间探测高度可达8~10 km,夜间探测高度可达10~12 km。对西安地区晴天、多云天和雾霾天的初步探测结果表明,该多波长激光雷达的性能完全能够满足对流层内气溶胶粒子的全天时和不同天气情况下的探测要求。

关键词 大气光学;多波长激光雷达;信噪比;气溶胶;Mie散射

中图分类号 P183.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0113001

Development of All Time Multi-Wavelength Lidar System and Analysis of Its Signal to Noise Ratio

Zhao Hu^{1,2} Hua Dengxin¹ Di Huige¹ Hou Xiaolong¹ Yan Leijie¹ Mao Jiandong¹

¹*School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China*

²*School of Electrical and Information Engineering, Beifang University of Nationalities, Yinchuan, Ningxia 750021, China*

Abstract An all time multi-wavelength lidar system used for the detection of troposphere atmospheric aerosols is developed. It utilizes the beams of 1064, 532 and 355 nm emitted by a Nd:YAG laser at the frequency of 10 Hz. This multi-wavelength lidar realizes the precise separation and extraction of Mie scattering signal at ultraviolet, visible and infrared wavelengths. The sky background noise is strongly restrained by using aperture and interference filters, and the all time detection is achieved. The signal to noise ratios (SNR) of actual detection results are compared with simulation results at three wavelengths. It is found that the SNR at 532 nm is the lowest in the daytime detection; however, the SNR at 355 nm is the lowest in the nighttime detection. This result is consistent with the theoretical calculation. The detection height can reach 8~10 km in the daytime and 10~12 km in the nighttime, providing the actual detection SNR is 1. The results of actual detection in Xi'an in fine, cloudy and haze days show that the multi-wavelength lidar can fully satisfy the need for detection of troposphere atmospheric aerosol particles at all time and under various weather conditions.

Key words atmospheric optics; multi-wavelength lidar; signal to noise ratio; aerosol; Mie scattering

OCIS codes 010.1290; 010.0280; 010.1310; 010.1350

收稿日期: 2014-06-21; 收到修改稿日期: 2014-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(61168004)、宁夏回族自治区自然科学基金(NZ14099)

作者简介: 赵 虎(1975—),男,博士研究生,副教授,主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: zhaoh_1@yeah.net

导师简介: 华灯鑫(1964—),男,博士,教授,主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn

1 引言

全球气候变化日渐引起人们的高度重视,大气气溶胶作为重要的气候强迫因子,在地气辐射收支平衡中起着至关重要的作用^[1]。大气气溶胶的光学和微物理特性及气溶胶的传输和辐射模式的研究日益成为近期科学研究的热点和前沿。

激光雷达可利用不同分子对激光的吸收、散射或荧光特性,在分子水平上探测物质的成分^[2]。因此,可获得许多气溶胶微物理特性,包括气溶胶粒子数浓度、粒子谱分布、粒子复折射率和粒子形状等。辐射传输中常用的气溶胶消光系数、散射相函数和单次反照率等光学参数也可从气溶胶物理参数通过 Mie 散射理论计算得到^[3]。因此,激光雷达成为大气遥感探测的重要工具和手段。

多波长激光雷达光谱范围宽,获得的光学参数多,可探测微粒种类丰富,因此利用多波长激光雷达技术研究大气气溶胶的物理和光学特性,已成为当今大气遥感的主流技术。国外很早就开展了这方面的研究,例如,1999年 Althausen 等^[4]在德国莱比锡大学对流层研究所构建了6波长11通道的扫描拉曼气溶胶激光雷达,这是目前世界上已知的功能最强、结构最复杂的多波长激光雷达。他们还研发了一套基于正则化方法研究气溶胶粒子微物理参数的完整的理论、仿真和实验体系^[5-7]。

近10年来,国内多波长激光雷达的研究也已逐步开展起来,2000年周军等^[8]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。2006年程学武等^[9]提出了双波长高空探测激光雷达技术,实现了30~80 km大气和80~110 km钠层的同时探测。2007年申麟等^[10]设计了532 nm和1064 nm的双波长激光雷达偏振测量接收光路,实现了双波长偏振激光雷达的应用。2008年钟志庆等^[11]研制了532 nm和1064 nm的双波长双视场米散射激光雷达,实现了高低层大气532 nm和1064 nm的同时探测。2009年迟如利等^[12]研制了可白天观测的532 nm和1064 nm双波长米散射激光雷达,用于研究对流层气溶胶。2012年伯广宇等^[13]针对机载双波长偏振激光雷达的技术特点,解决了激光雷达应用于航空平台的一些关键问题。2013年刘东等^[14]研制了三波长拉曼偏振激光雷达,用于研究气溶胶的微物理特性和卷云的物理性质。2014年伯广宇等^[15]利用双波长激光雷达探测了合肥地区雾霾气溶胶光学和吸湿性质。

以往的多波长激光雷达主要以双波长为主,对不同时间和天气情况下不同波长的信噪比分析较少。本文设计了三个波长的后向散射式激光雷达,利用背景光抑制技术实现了全天时探测,通过对多波长激光雷达日间和夜间探测信噪比的分析,阐明了多波长激光雷达的工作原理,通过对不同天气情况下探测的应用分析,证明了该多波长激光雷达达到了探测要求的性能指标。

2 系统组成及工作原理

该多波长激光雷达系统主要由4部分组成,分别为发射子系统、接收子系统、分光子系统和信号采集子系统。图1给出了多波长激光雷达系统的组成原理图。

发射子系统由灯抽运的Nd:YAG激光器和二倍频晶体(SHG)、三倍频晶体(THG)组成,重复频率为10 Hz的1064、532和355 nm的激光束,经光谱范围为300~1100 nm的宽带全反镜M1以非同轴方式发射到大气中。大气中的气溶胶颗粒与激光束相互作用产生光散射信号,接收子系统用主镜直径250 mm、焦距1980 mm的卡塞格林望远镜接收后向散射信号。分光系统将接收到的后向散射信号经透镜准直后,由全反镜M2入射到分色片BS1、BS2和1064 nm二色镜M3上,由分色片分出355、532和1064 nm信号,再经过对应波长的窄带干涉滤光片IF1、IF2和IF3,经聚焦镜lens1、lens2和lens3聚焦后,355 nm和532 nm信号由光电倍增管(PMT)接收,1064 nm信号由雪崩光电二极管(APD)接收。

本设计为了在日间探测中抑制杂散背景光,在望远镜焦平面放置一个孔径为0.8 mm的光阑,将视场角限制在1 mrad,在光阑后面放置一个准直透镜来汇聚入射光辐射。采用带宽较窄的干涉滤光片减少天空背景辐射,由于1064 nm和532 nm发射光功率较强,采用带宽为5 nm的干涉滤光片,分光效率分别为72.9%(1064 nm处)和66.7%(532 nm处),355 nm通道采用1 nm带宽的干涉滤光片,分光效率为24.75%。通过这些背景光抑制措施,实现了多波长激光雷达的全天时探测。

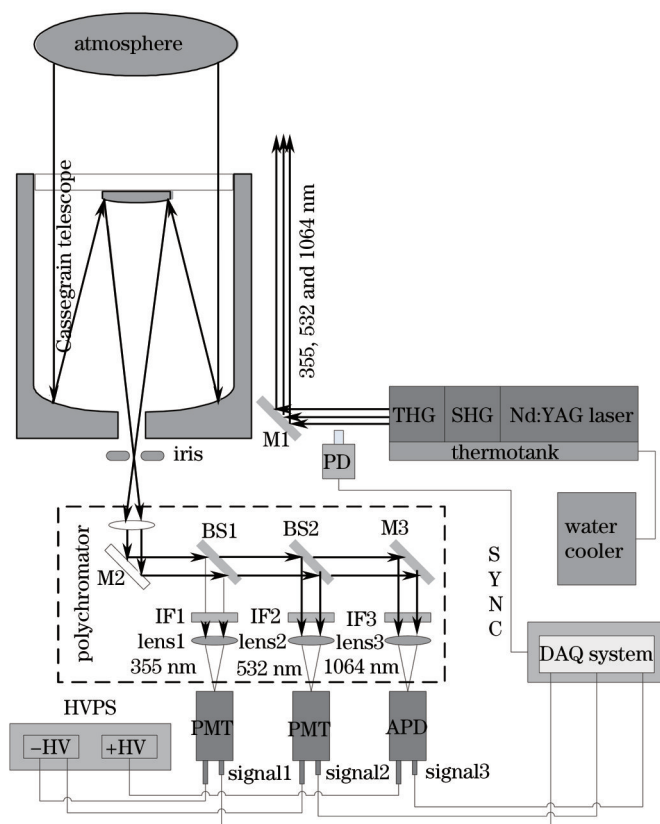


图1 多波长激光雷达组成原理图

Fig.1 Schematic diagram of multi-wavelength lidar

数据采集系统由光电二极管(PD)同步触发后,通过三个采集通道分别采集三个波长的后向散射信号。多波长激光雷达系统配置如表1所示。

表1 三波长激光雷达系统配置

Table 1 Configuration of the three-wavelength lidar system

Emission and receiver system		Polychromator		
Laser	Q-switched Nd: YAG	Beam splitter	Reflectivity /%	Transmission /%
Wavelength	1064, 532, 355 nm	Beam splitter 1	99.8 at 355 nm	99.7 at 1064 nm 99.5 at 532 nm
Single pulse energy	1 J at 1064 nm 450 mJ at 532 nm 200 mJ at 355 nm	Beam splitter 2	97.5 at 532 nm 99.7 at 355 nm	99.2 at 1064 nm
Single pulse width	9 ns at 1064 nm 9 ns at 532 nm and 352 nm	Interference filter	CWL/nm	Peak transmission /% FWHM/ nm
Frequency	10 Hz	IF1	355±2	25.0 1
Telescope diameter	100" (254 mm)	IF2	532±2	67.4 3
Detector	PMT: CR110 APD	IF3	1064±2	74.4 5

3 系统探测信噪比

系统信噪比是激光雷达整机系统的设计、研制和定标最重要的性能参数。对于大气监测用激光雷达,大气气溶胶的散射是有用信号,但探测目标散射信号与天空背景噪声融为一体。特别是多波长激光雷达,不同波长下的背景光噪声有较大差别,而且各通道使用不同的探测器,使得不同波长通道的信噪比各不相

同,因此,分析多波长激光雷达各通道的信噪比具有十分重要的意义。

日间探测时,光学接收系统的噪声主要来自于天空背景噪声,该背景光噪声能量可表示为

$$E_b^N(\lambda) = S_b(\lambda)\Omega_0 A_0 \tau_d \xi(\lambda), \quad (1)$$

式中 λ 为发射激光所在的中心波长, $S_b(\lambda)$ 为天空的光谱辐射, $\xi(\lambda)$ 为接收系统在波长 λ 处的传输效率, A_0 为接收系统的有效孔径, Ω_0 为接收立体角, τ_d 为探测时间。从(1)式可以看出,不同波长下的天空背景光是不同的。该天空背景光噪声在光电探测器上引起的背景噪声电流为 $i_{bk} = \sqrt{2eP_{bk}\rho_i B}$,其中 e 为电子电量, P_{bk} 为背景光功率, ρ_i 为光电探测器电流响应率, B 为探测系统带宽。

同时,随机信号光子引起的散弹噪声电流为 $i_{sN} = \sqrt{2eP_s\rho_i B G^2}$, P_s 为接收信号光功率, G 为放大器的增益。光电探测器的暗噪声电流为 $i_{dk} = \sqrt{2eI_{dk} B}$, I_{dk} 为探测器暗电流。热噪声电流为 $i_{th} = \sqrt{4kTB F_N / R_{eq}}$, F_N 为接收机的噪声因子, k 为波尔兹曼常数, T 为环境温度, R_{eq} 为输出电路的等效负载电阻。在非相干接收情况下,信号电流为 $i_s = \frac{\eta(\lambda)eP_s}{h\nu}$, $\eta(\lambda)$ 为探测器量子效率, h 为普朗克常数, ν 为光的频率。

通常,信噪比与脉冲数的平方根成正比,因此,可得非相干接收激光雷达的系统信噪比(SNR, R_{sN})为

$$R_{sN} = \frac{Gi_s \sqrt{n}}{\left[(4kTB/R_{eq}) + 2eBG^2(i_s + i_b + i_d) \right]^{1/2}}, \quad (2)$$

式中 n 为平均脉冲数。

4 三波长激光雷达系统信噪比分析

由 Mie 散射激光雷达方程^[16]、美国标准大气模型和气溶胶后向散射模型及系统参数,可得三波长激光雷达回波信号随高度变化的仿真廓线,如图 2 所示。

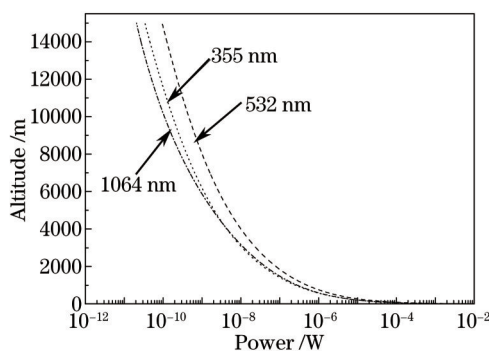


图 2 多波长激光雷达回波信号高度廓线

Fig.2 Vertical profiles of return signals detected by multi-wavelength lidar

从图 2 可见,在 5 km 以下,355 nm 和 1064 nm 的回波信号强度基本一致,这说明 5 km 以下 Mie 散射和 Rayleigh 散射强度相当,在 5 km 以上, Rayleigh 散射大于 Mie 散射,说明气溶胶浓度随高度减小比大气分子减小得快。而 532 nm 回波中既有 Rayleigh 散射又包含 Mie 散射,因此 532 nm 通道的回波强度高于 355 nm 和 1064 nm 通道。

4.1 日间探测信噪比分析

由(1)式可知,接收到的背景光辐射不但与波长 λ 有关,而且与接收系统的有效孔径 A_0 和立体角 Ω_0 有关。根据典型天空背景辐射^[17]和系统参数由(1)式计算得到三个波长的天空背景辐射功率分别为: $P_b(355) = 1.217 \times 10^{-10}$ W, $P_b(532) = 1.095 \times 10^{-7}$ W, $P_b(1064) = 7.3 \times 10^{-10}$ W。背景光产生的电流为 $i_b = \frac{\eta(\lambda)eP_b(\lambda)}{h\nu}$ 。由(2)式可得日间探测各通道理论信噪比,如图 3(a)所示。

由图 3(a)可见,日间探测时,1064 nm 红外光信号的信噪比最高,而 532 nm 可见光的信噪比最低,紫外光 355 nm 的信噪比介于可见光和红外光之间。这是由于 PMT 的增益比 APD 的增益小一个数量级, PMT 的量子

效率比 APD 的量子效率低,而两者的暗电流处在同一数量级,因此,日间探测时红外信号的信噪比较高。三个波长中 532 nm 可见光谱的天空背景辐亮度最大,因此在日间探测时可见光的信噪比最低。当可接受的最小信噪比为 1 时,从图 3(a)可得日间理论可探测的最大高度为 14 km 左右。

图 3(b)所示为 2013 年 11 月 15 日 15:22,多云天气下日间探测的三个通道的实际信噪比廓线。从图 3(b)中可知,日间探测 532 nm 信号的信噪比最低,在高度 8 km 左右信噪比逐渐下降为 1,可探测高度为 8 km 左右,与理论值相比有所下降,一方面是由于云层吸收了发射激光的能量,另一方面是由于实际探测中存在较多的环境噪声。

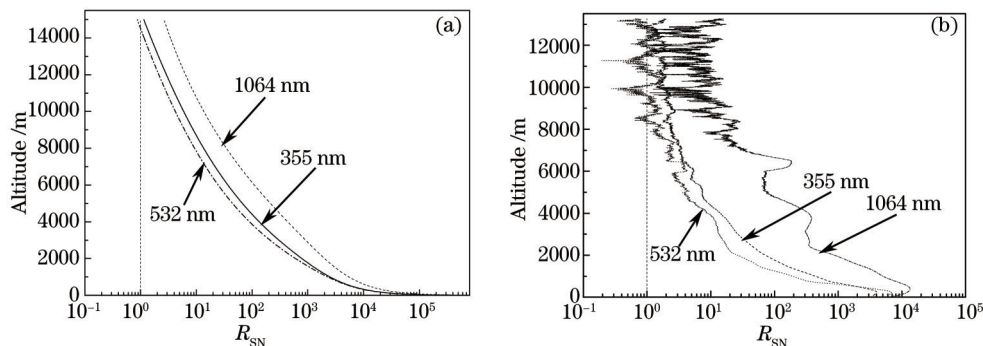


图 3 日间探测信噪比。(a) 理论信噪比; (b) 实际信噪比

Fig.3 SNR of the daytime detection. (a) Theoretical SNR; (b) actual SNR

4.2 夜间探测信噪比分析

夜间探测时,可认为无背景光干扰,因此,用(2)式计算信噪比时,分母就少了 i_b 一项,其余不变。各通道夜间探测理论信噪比如图 4(a)所示。从图 4(a)中可见,夜间探测时 1064 nm 信噪比仍然最高,而 532 nm 的可见光信噪比要高于紫外光 355 nm 的信噪比,这是由于没有天空背景光噪声时 532 nm 的信号光功率要大于 355 nm 信号光功率。当可接受信噪比下降到 1 时,由图 4(a)可见夜间理论可探测的最大高度为 15 km 左右。

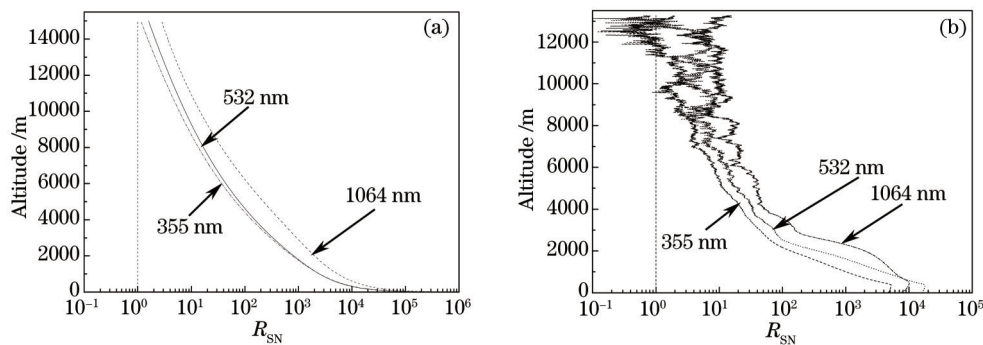


图 4 夜晚探测信噪比。(a) 理论信噪比; (b) 实际信噪比

Fig.4 SNR of the nighttime detection. (a) Theoretical SNR; (b) actual SNR

图 4(b)为 2013 年 11 月 14 日 20:35 实际探测的信噪比廓线。从图 4(b)中可知,夜间实际探测 355 nm 信号信噪比最低,这与理论计算一致。当信噪比下降到 1 时,实际可探测高度为 11 km,与理论值相比有所下降,但与日间探测高度相比是增加的,这说明夜间各个波长背景光噪声整体下降,尤其是可见光的背景噪声下降很多。

4.3 系统信噪比的优化

为了提高系统探测的信噪比,增加系统的探测高度和探测性能,由(2)式可以看出,提高输出电路的等效电阻 R_{eq} ,可降低由于温度变化引起的热噪声。在满足数据采集系统要求的前提下,降低系统带宽 B ,可以减少热噪声、散弹电流、暗电流和背景光电流引起的噪声,从而提高系统的信噪比。

5 多波长激光雷达初步实验结果与分析

用该多波长激光雷达对西安地区晴天、多云天和雾霾天的大气气溶胶进行了初步探测。采用模拟探测

方式,一次探测累积时间为 10 min,采样率为 50 M/s,采样点数为 5000 点,5000 个脉冲。

5.1 晴天实际探测结果

图 5(a)所示为 2013 年 11 月 14 日 20:18,该激光雷达晴天探测得到的西安城区气溶胶消光系数廓线。从图 5(a)可以看到,随着探测高度的增加,三个波长消光系数的噪声随着波长的增加而减小,这与图 5(b)中信噪比的分析计算是吻合的。

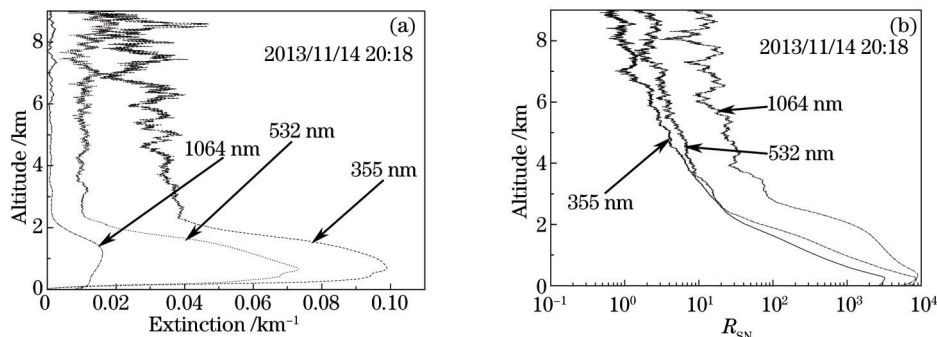


图 5 (a) 晴天探测气溶胶消光系数廓线; (b) 晴天探测信噪比

Fig.5 (a) Detected extinction profiles of aerosols on a fine day; (b) detected SNR on a fine day

5.2 有云天实际探测结果

图 6(a)为 2013 年 11 月 15 日 11:17,该激光雷达有云天探测得到的西安城区气溶胶消光系数廓线,可知三个波长在 4 km 和 6 km 高度都探测到云层,并且穿透云层后继续有回波被接收到,说明云层不是很厚。此外在云层高度层粒子的消光系数明显增强。云层中三个波长的消光系数存在重叠现象,说明这时粒子半径较大,已经不能满足消光系数和波长的依赖关系。从图 6(b)可看出信噪比与图 3 分析的日间探测 532 nm 信噪比最低相吻合,并且有云处信噪比明显增大。

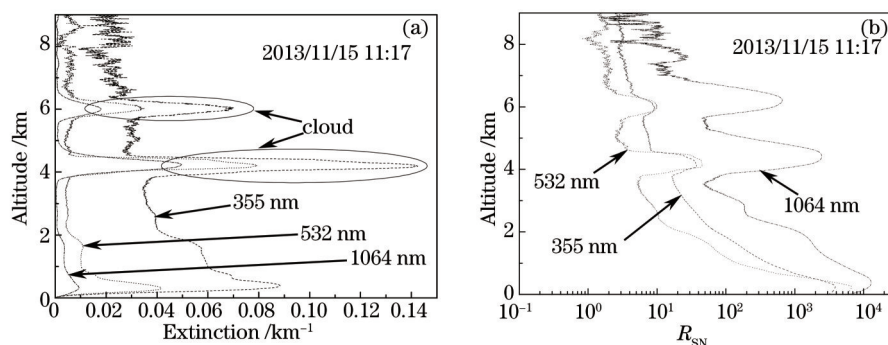


图 6 (a) 有云天探测气溶胶消光系数廓线; (b) 有云天探测信噪比

Fig.6 (a) Vertical profiles of aerosols under cloudy condition; (b) SNR under cloudy condition

5.3 雾霾天实际探测结果

图 7(a)为 2013 年 10 月 27 日 21:35,该激光雷达在中度雾霾天条件下探测得到的西安城区气溶胶消光系数廓线。雾霾天气下的消光系数廓线与晴天和多云天有明显区别,在 1 km 高度左右存在一个消光系数较小的区域,在 2~6 km 高度三个波长的消光系数逐渐增大,并且保持在一个水平基本不变,这说明存在较厚的气溶胶层,这正是雾霾存在的高度层[图 7(a)中圈出的部分],在 6 km 以上消光系数逐渐下降,气溶胶含量明显减少。

这一现象与云层气溶胶消光系数突然增大而后很快下降有很大区别,与晴天气溶胶消光系数随着高度的增加而逐渐减小的趋势也不同。从图 7(b)可知雾霾天探测信噪比仍然满足夜间探测时 355 nm 信噪比最低,而 1064 nm 信噪比最高。

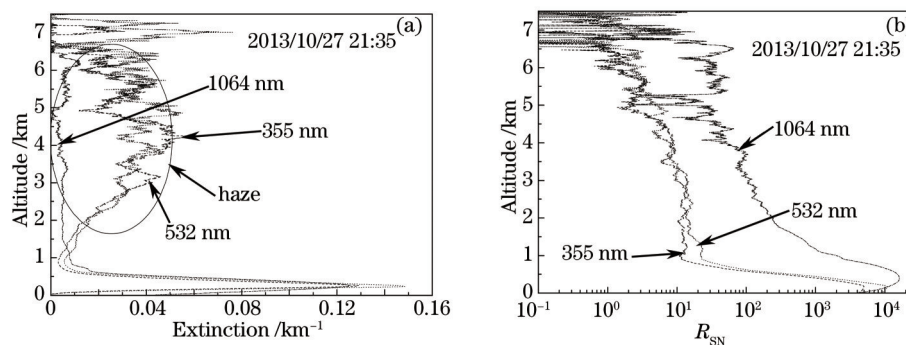


图7 (a) 雾霾天探测气溶胶消光系数廓线; (b) 雾霾天探测信噪比

Fig.7 (a) Detected extinction profiles of aerosols on a haze day; (b) detected SNR on a haze day

6 结 论

研制了全天时探测对流层内大气气溶胶的多波长激光雷达,通过对日间和夜间实际探测信噪比的结果分析和对不同天气情况下实际探测消光系数和信噪比结果的分析,验证了该多波长激光雷达系统设计的可行性和可靠性。该多波长激光雷达不但实现了全天时探测对流层内气溶胶的要求,而且还能适应全天候的探测要求。这些都说明了该多波长激光雷达具有较高的先进性和实用性。尤其是运用多波长激光雷达信号可以研究对流层内气溶胶粒子的谱分布和粒子的种类等微物理特性,还可以反演气溶胶粒子光学特性的时空变化规律,为雾霾的形成和演化机制的研究奠定了坚实的硬件基础。

参 考 文 献

- 1 R J Charlson, J Heintzenberg. Aerosol Forcing of Climate[M]. Chichester: Wiley, 1995.
- 2 Dai Yongjiang. Laser and Infrared Sounds Principle[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. 271-272.
戴永江. 激光与红外探测原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012. 271-272.
- 3 Qiu Jinhuan, Chen Hongbin. Atmospheric Physics and Atmospheric Sounding[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005. 11-12.
邱金桓, 陈洪滨. 大气物理与大气探测学[M]. 北京: 气象出版社, 2005. 11-12.
- 4 D Althausen, D Müller, A Ansmann, *et al.*. Scanning 6-wavelength 11-channel aerosol lidar[J]. J Atmos Ocean Technol, 2000, 17 (11): 1469-1482.
- 5 D Müller, U Wandinger, A Ansmann. Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: Theory[J]. Appl Opt, 1999, 38(12): 2346-2357.
- 6 D Müller, U Wandinger, A Ansmann. Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: Simulation[J]. Appl Opt, 1999, 38(12): 2358-2368.
- 7 D Müller, F Wagner, U Wandinger, *et al.*. Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: Experiment[J]. Appl Opt, 2000, 39(12): 1879-1892.
- 8 Zhou Jun, Yue Guming, Jin Chuanjia, *et al.*. Two-wavelength Mie lidar for monitoring of tropospheric aerosol[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(10): 1412-1417.
周 军, 岳古明, 金传佳, 等. 探测对流层气溶胶的双波长米氏散射激光雷达[J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1412-1417.
- 9 Cheng Xuewu, Song Juan, Li Faquan, *et al.*. Dual-wavelength high altitude detecting lidar technology[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33 (5): 601-606.
程学武, 宋 娟, 李发泉, 等. 双波长高空探测激光雷达技术[J]. 中国激光, 2006, 33(5): 601-606.
- 10 Shen Lin, Jiang Yuesong, You Rui. Design of the multiwavelength polarimetric lidar receiver[J]. Optical Technique, 2007, 34S(12): 3-5.
申 麟, 江月松, 尤 睿. 双波长偏振测量激光雷达接收光路的设计[J]. 光学技术, 2007, 34S(12): 3-5.
- 11 Zhong Zhiqing, Liu Bo, Fan Aiyuan, *et al.*. Two-wavelength Mie lidar with two receivers[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2008, 3(3): 173-178.
钟志庆, 刘 博, 范媛媛, 等. 双波长双视场米散射激光雷达[J]. 大气环境与光学学报, 2008, 3(3): 173-178.
- 12 Chi Ruli, Wu Decheng, Liu Bo, *et al.*. Dual-wavelength Mie lidar observations of tropospheric aerosols[J]. Spectroscopy and Spectral

- Analysis, 2009, 29(6): 1468-1472.
- 迟如利, 吴德成, 刘 博, 等. 双波长米散射激光雷达探测对流层气溶胶光学特性[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(6): 1468-1472.
- 13 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.
- 14 Liu Dong, Tao Zongming, Wu Decheng, *et al.*. Development of three-wavelength-Raman-polarization lidar system and case study [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0228001.
刘 东, 陶宗明, 吴德成, 等. 三波长拉曼偏振激光雷达系统研制及探测个例[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0228001.
- 15 Bo Guangyu, Liu Dong, Wu Decheng, *et al.*. Two-wavelength lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties in fog and haze days[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0113001.
伯广宇, 刘 东, 吴德成, 等. 双波长激光雷达探测典型雾霾气溶胶的光学和吸湿性质[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0113001.
- 16 R M Measures. Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications[M]. Malabar: Krieger Publishing Company, 1992.
- 17 W K Pratt. Laser Communication Systems[M]. New York: Wiley, 1969.

栏目编辑: 吴秀娟