

多普勒测风激光雷达风场数据影响因素分析

王国成¹ 孙东松² 段连飞¹ 舒志峰²

¹中国人民解放军陆军军官学院, 安徽 合肥 230031

²中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230031

摘要 介绍了基于法布里-珀罗(F-P)标准具的多普勒测风激光雷达(DWL)的基本工作原理,给出了DWL的典型探测数据;对影响DWL风场探测数据精度的因素进行了深入的剖析,主要包括背景光强度、探测器的工作状态、发射激光的频率锁定、种子激光器的工作环境、转场或温度骤变对接收机引起的形变等因素;背景光过强会导致系统信噪比急剧降低,探测器饱和将会处于非线性工作状态,进而生成无效数据,发射激光失锁将会导致风廓线平移,种子激光器工作环境温度不恒定将会导致激光跳变等现象,影响因素逐一克服后,DWL与探空气球的风速偏差在1.4 m/s以内、风向偏差在2.2°以内。

关键词 大气光学; 测风激光雷达; 多普勒频移; 法布里-珀罗标准具; 瑞利散射

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0901003

Analysis of Factors Affecting the Data Accuracy of Doppler Wind Lidar

Wang Guocheng¹ Sun Dongsong² Duan Lianfei¹ Shu Zhifeng²

¹Army Officer Academy of PLA, Hefei, Anhui 230031, China

²School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract The fundamental working theory of the Doppler wind lidar (DWL) based on Fabry-Perot (F-P) etalon is introduced. The typical detection data of DWL system is provided. The factors depressing DWL wind detection accuracy are analyzed, including background light intensity, operation state of detector, the locking state of laser frequency, the environment of seed laser, deformation of the receiver caused by sudden changes of the workplace temperature, and so on. Strong background light will cause the system signal-to-noise ratio decreases rapidly. Saturated detectors will be in nonlinear working state and generate invalid data. The lose lock on laser will cause wind profile to move parallel, the instability of seed laser environment temperature will cause the laser jump phenomenon. After overcoming the factors one by one, the wind speed variation of DWL with balloons is within 1.4 m/s, wind direction deviation is within 2.2°.

Key words atmospheric optics; wind laser lidar; Doppler frequency shift; Fabry-Perot etalon; Rayleigh scattering

OCIS codes 010.0280; 220.4830; 280.4788

1 引言

大气风场探测是大气科学研究中的热点问题之一,对数值天气预报发展有着重要的积极作用,极端天气的频繁出现对农业、旅游业、渔业等经济生产带来重大的影响,航空航天飞行器平台系统的设计、实验模拟以及安全飞行,均需要大气风场数据;另外,大气风场在对流层与平流层之间的相互作用和耦合过程中也具有重要影响^[1]。具体来说,一方面,承载信息系统的平流层飞行器利用大气风场环境特性,在某个区域内长时间滞空,可以实现准定点观测,能够满足对指定区域或目标的连续观测需求,国家已将高分辨率对地观测系统列入《国家中长期科学和技术发展纲要(2006-2020年)》,相关单位已展开了平流层飞行器平台的开发和应用^[2],那么,大气风场环境特性研究将变得紧迫;另一方面,大气风场在对流层与平流层之间的相互作用和耦合过程中具有重要角色,它影响着动力辐射耦合和双向的大气质量和成分的交换^[1]。

收稿日期: 2015-03-13; 收到修改稿日期: 2015-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(41374156, 41304123)、安徽省自然科学基金(1308085MD54)

作者简介: 王国成(1975—),男,博士,讲师,主要从事激光雷达遥感探测技术方面的研究。E-mail: guochengwang@126.com

我国缺乏大气风场观测数据,对于指定区域风场分布特性的研究主要是应用ERA-40再分析数据和NCAR/NCEP再分析数据,所用数据的经、纬度分辨率均为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,再分析数据的时间和空间分辨率比较粗糙,因此用它的的数据计算得到的局部区域风场变化的时间和地点不是非常精确^[3]。

探空气球是探测大气风场常用的手段,但是,它的探测周期较长,也存在恶劣天气条件下放球困难、容易造成丢球、数据失测等问题^[4]。多普勒测风激光雷达是探测大气风场时空分布的强有力手段,国外已经有多家的报道^[5-8];国内也做出了相应的设备,比如中国海洋大学、中国科学技术大学、中国科学院安徽光学精密机械研究所等单位,并且进行了应用^[9-11];对于中高层大气风场来说,激光雷达主要接收的是瑞利散射信号,应用直接探测瑞利散射多普勒测风激光雷达(DWL)更为有效^[12-13]。

基于中国科学技术大学激光雷达课题组研制的使用法布里-珀罗标准具(F-P)作为鉴频器件的瑞利散射DWL,分析了系统进行大气风场探测时影响精度的主要外场因素,包括背景光强度、探测器的工作状态、发射激光的频率是否稳定、种子激光器的工作环境是否恒定、转场或温度骤变对接收机引起的形变导致两个边缘通道分配的能量不匹配等因素。

2 瑞利散射 DWL 系统

在对流层与平流层内存在大量的气溶胶和大气分子等微小颗粒,这些颗粒将伴随大气风场的变化而随风飘动,直接探测多普勒测风激光雷达向探测区域发射激光束,激光被气溶胶粒子和大气分子散射,其中一部分散射光沿发射方向返回,被激光雷达望远镜接收。风对发射激光进行调制,产生多普勒效应。在时域上,大气中分子和气溶胶的后向散射连续信号由瑞利散射DWL系统望远镜接收,不同距离的散射回波信号对应不同的采集时间,可以得到大气回波信号的空间分布;在频域上,如果发射的激光是单一频率的,不同时刻接收的后向散射信号中的频谱将携带由于大气粒子运动产生的多普勒频率,利用频谱分析器件通过数据处理可以获得多普勒频率,于是可以计算得到径向风速,选择对称的四个方向分别获得径向风速,然后进行矢量合成可以得到水平大气风场。

$$V = \frac{\lambda}{2} \Delta\nu, \quad (1)$$

式中 V 是径向风速, λ 是激光波长, $\Delta\nu$ 是多普勒频移。

瑞利散射 DWL 系统为了实现上述功能,一般由四个部分组成:接收天线与扫描子系统、发射子系统、接收子系统、控制和信号处理子系统,如图 1 所示。

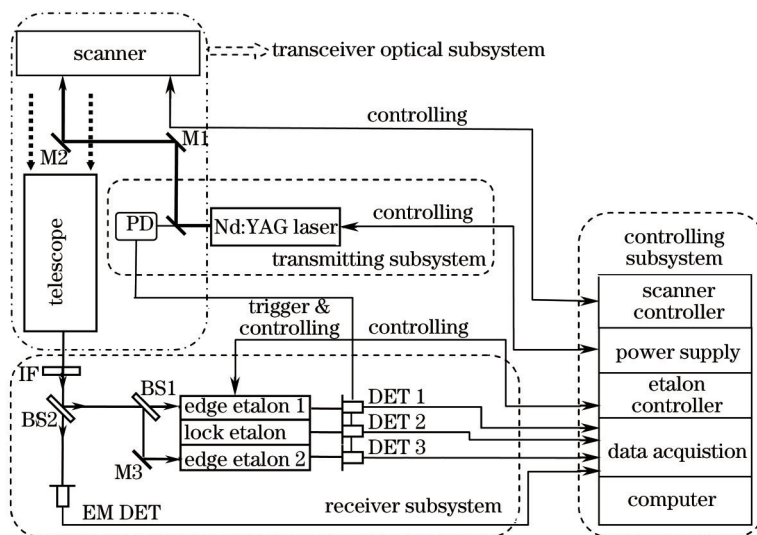


图 1 瑞利散射 DWL 系统

Fig.1 Framework of Rayleigh scattering DWL system

以自主研发的瑞利散射 DWL 系统(主要参数如表 1 所示,探测性能如表 2 所示)为例,系统探测高度达到平流层区域,发射子系统选用高能量、窄带宽、频率相对稳定的种子注入式的 Nd:YAG 脉冲激光,该型激光器可以产生 1064、532 和 355 nm 三个波长的激光,根据大气分子后向散射能量与激光波长的 λ^{-4} 成正比,并且在高层大气中

分子的能量相对稀薄,为了获得较高的后向散射能量,系统选用了355 nm波长激光,经过扩束、压缩发散角、与接收天线(望远镜)保持同轴后,通过二维扫描子系统指向被测区域;大气分子的后向散射光沿光束发射方向返回并经过二维扫描子系统进入光学望远镜,将散射光汇聚到位于焦点的多模光纤,光纤将光信号导入接收子系统。

表1 DWL系统主要参数

Table 1 Main parameters of DWL system

	Parameter	Value
Transmitter	wavelength	355 nm
	laser energy pulse	400 mJ @355 nm
	laser repetition frequency	30 Hz
	telescope/scanner aperture	45 cm
Transceiver	field of view	0.2 mrad
	optical efficiency	>80%
	filter bandwidth	0.2 nm @355 nm
Receiver	etalon FSR	12 GHz
	etalon FWHM	1.7 GHz
	edge channel separation	5.1 GHz

表2 DWL系统主要探测指标

Table 2 Main performance parameters of DWL system

Parameter	Value
Attitude range	10~40 km
Wind speed range	-100~100 m/s
Elevation resolving	0.1 km (10~20 km); 0.5 km (20~40 km)
Wind speed precision	3 m/s@20 km; 6 m/s@40km
Wind profile distributing	5 min/profile@20 km; 30 min/profile@40 km

接收子系统是激光雷达系统的核心,它的器件选型和参数设计将直接影响系统的大气风场探测精度^[4],系统选用了F-P标准具作为鉴频器件,它的最大优势在于能够将微弱的光频信号转化为能量探测,将获得的能量信息根据F-P标准具的特性反向推算求得相应的激光频率,为了保证测量精度,F-P标准具要将后散射信号全部收集并且保持性能稳定,系统使用了双边缘检测技术,根据风场测量相对误差与双边缘通道峰值间距的关系,F-P标准具的带宽参数选取为1.7 GHz,双边缘通道峰值间距选取5.1 GHz,它的最大透射率达到60%,将两个标准具的透射率曲线分别位于分子散射谱的两侧,频谱相对位置结构如图2所示^[5]。

为了提高F-P标准具对激光发射信号的锁定能力,设计了第三个通道即参考通道,它的频谱半高宽处位于双边缘通道交叉点处,用于探测和锁定激光出射信号,它的步进台阶为0.083 nm,并且参数与边缘通道一致,同样通过探测它的能量来反演激光出射频率,图3为锁定通道的反函数特性。

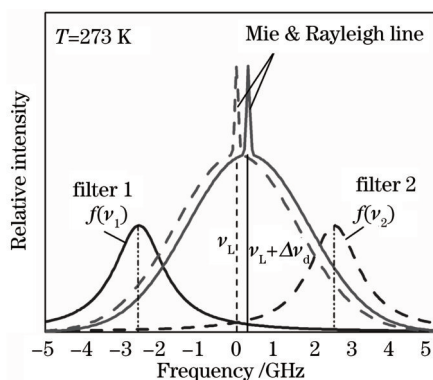


图2 大气分子后向散射光谱图

Fig.2 Atmospheric molecular backscattering spectra

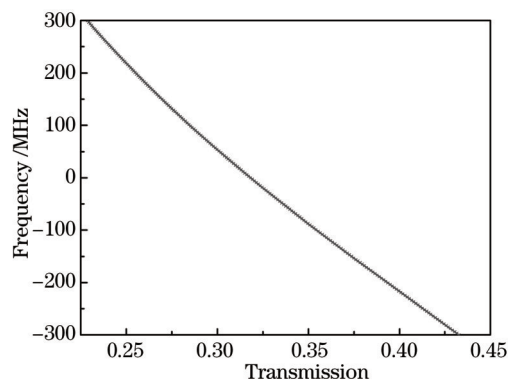


图3 DWL锁定通道透射率反函数特性

Fig.3 Inverse function characteristics of lock channel of DWL

图3的纵坐标表示激光出射频率发生的多普勒频移,横坐标表示对应的标准具透射率,体现了标准具的鉴频特性,当激光频率发生变化时,在标准具的透射率上会发生相应的变化,并且在局部小范围变化过程中,频率与透射率的变化呈线性关系。

瑞利散射DWL系统目前已经连续4年在野外进行大气风场观测实验,取得了丰富的外场实验经验,列

举其中某一年具有代表性的四组数据如图4所示。

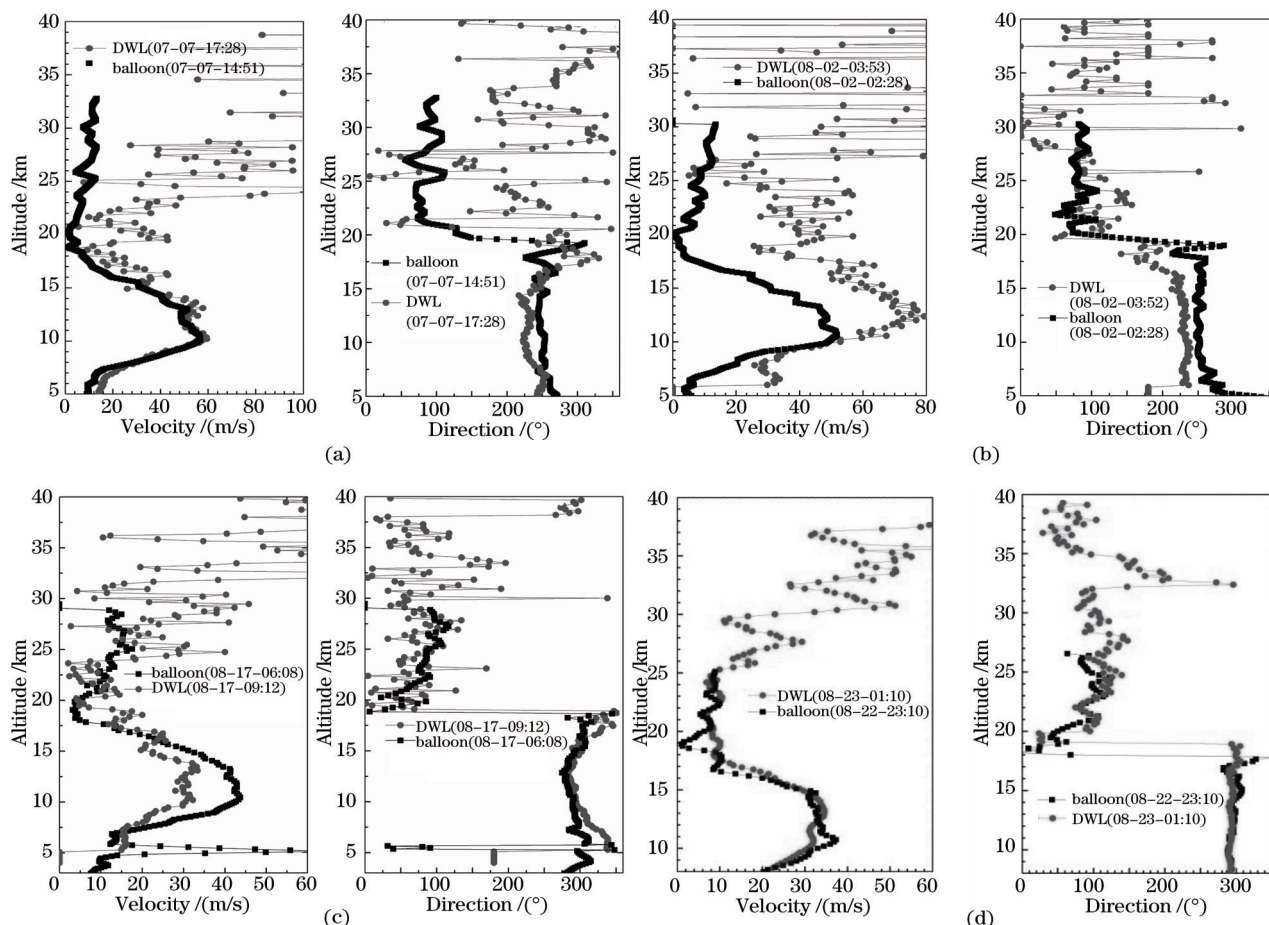


图4 瑞利散射 DWL与探空气球对比数据图

Fig.4 Correlation data between Rayleigh scattering DWL and balloon

3 DWL风场探测数据分析

图4给出瑞利散射DWL某年在新疆地区的风场探测数据,并且与在同一时间段、同一场地进行风场探测的控空气球实验数据进行了对比,四组数据分别为DWL在不同的外界环境和状态下测得的,与探空气球数据呈现了不同的对比关系,并对风场数据和系统状态进行分析。

图4(a)组数据是由DWL在17:28时刻给出的,能够看出在5~20 km高度范围内与探空气球数据的风速与风向吻合的较好;但是,在20 km以上,DWL风速数据变化幅度较大、风向的变化相对频繁,提取系统接收的原始信号并对其信噪比(SNR)^[14]进行计算,如图5所示。

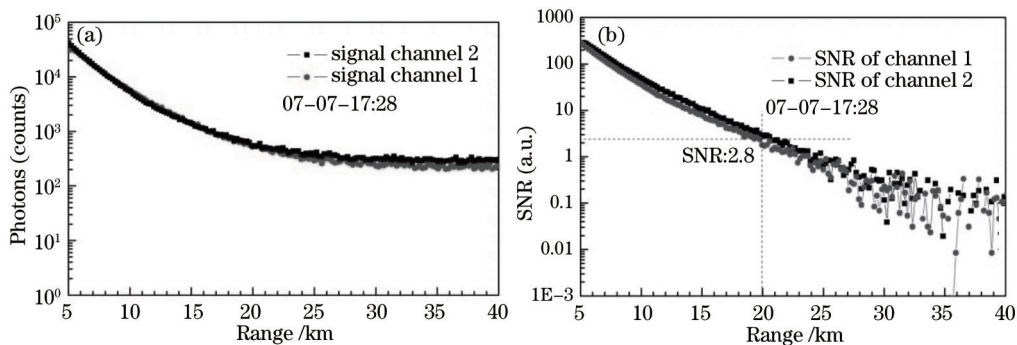


图5 (a) 后向散射信号光强; (b) 信号通道信噪比

Fig.5 (a) Backscatter signal intensity; (b) SNR of signal channel

由图 5(a)可知,对应 20 km 高空的回波信号还是存在的,但是逐渐延伸到 40 km 高度上,后向散射信号光子数变化不明显,说明信号中夹杂着大量的噪声;由图 5(b)可知,对应 20 km 高度上信号通道的信噪比是非常低的,符合图 4(a)组数据的现象。实验所在场地新疆与内地时差两小时,下午 16:30 左右是当地一天中温度最高的时段,背景光非常强,系统仍然采用常规的径向累积脉冲数,导致系统信噪比降低,探测偏差增大;在白天时段的风场测量需要采取增加径向激光脉冲累积数的方法,同时,增加窄带滤光片(IF)滤除较强的背景光,以提高信号通道的信噪比。

图 4(b)组数据中 DWL 给出的大气风场廓线与探空气球的发展趋势是一致的,但是,两个廓线之间存在整体平移。说明 DWL 用于反演的激光发射频率值与实际的激光发射频率存在差值,在实际测量中,为了保证信噪比,对信号进行累积,在累积的过程中,因为微小的温度变化等因素,致使激光发射频率发生跳变,但是,在风场反演时仍然使用最初锁定的激光频率进行计算;而激光发射频率又与种子激光器工作环境温度直接相关,取其环境温度与用来监控激光束频率的标准具透射率监控数据如图 6 所示。

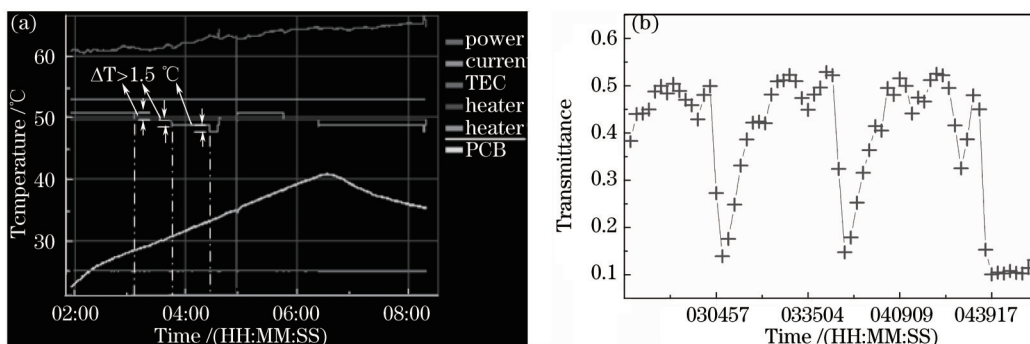


图 6 (a)种子激光器温度监控; (b) 锁定通道标准具透射率

Fig.6 (a) Temperature monitor of seed laser; (b) lock channel etalon transmittance

图 6(b)是由激光器产生的三倍频(355 nm)激光在扩束之前分出一小部分激光直接进入接收机锁定通道的透射率曲线,曲线呈现缓慢地漂移和剧烈地抖动,该透射率曲线的一个定量描述关系为:当透射率变化 1%时,对应的频率变化为 33.3 MHz,对应的速度探测偏差为 6 m/s;在时刻 030457、035020 和 043917 上发生跳变,跳变幅度均达到 30%以上,导致锁定标准具无法跟踪锁定激光出射频率,并且此时的后向散射光谱将移出探测范围,对应 20 min 内的数据将是无效的;图 6(a)是种子激光器的温度监控曲线,对应透射率跳变的三个时刻,种子激光器(heater2)的温度均发生了跳变,幅度 $\Delta T > 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明激光器出射频率的跳变与种子激光器温度变化有直接对应关系。

为了提高 DWL 风场探测精度,需要对激光出射频率进行稳定,将种子激光器置于温度控制精度为 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 的环形腔体温控箱内,对种子激光器的工作环境进行恒温控制,原理如图 7 所示。经过激光雷达长期外场实验,稳频效果是非常明显的。

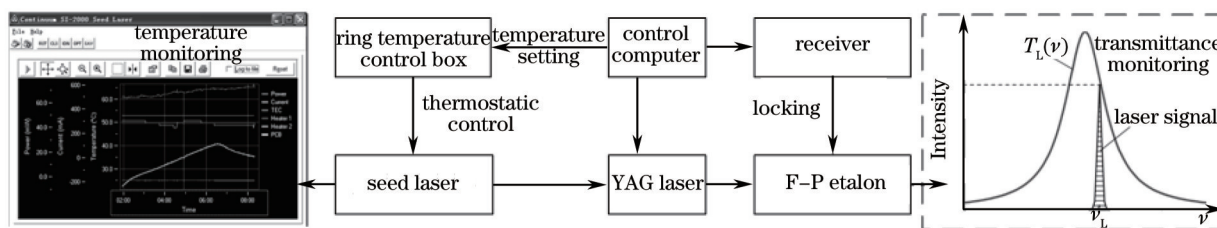


图 7 种子激光器温度监视、稳频实验系统与透射率监视

Fig.7 Seed laser temperature, frequency stabilization system and transmittance monitor

图 4(c)组数据中探空气球探测到在 5 km 高度左右有一较大风切变,风速一度达到 70 m/s,风向属于旋转风,而 DWL 没有探测到风切变。分析其主要原因:

1) 该 DWL 系统设计探测的主要对象为大气分子,探测范围为 10~40 km 高度,它对应的信号强度动态范围在 3~4 个数量级,信号的强度如图 5 所示,而在 5 km 高度左右的气溶胶信号非常强^[15-16],远远超过了探测器件的线性响应范围,需要使用可编程门限,将低层大气信号截止,接收瑞利散射信号。

2) 两个边缘通道的信号能量不匹配,如图1中的BS1分束片,反射与透射比均衡时,整个系统的信噪比最高,反之,信噪比将降低,为了增强对比性,将图5的回波信号按照透反比35/65进行信噪比计算如图8所示。

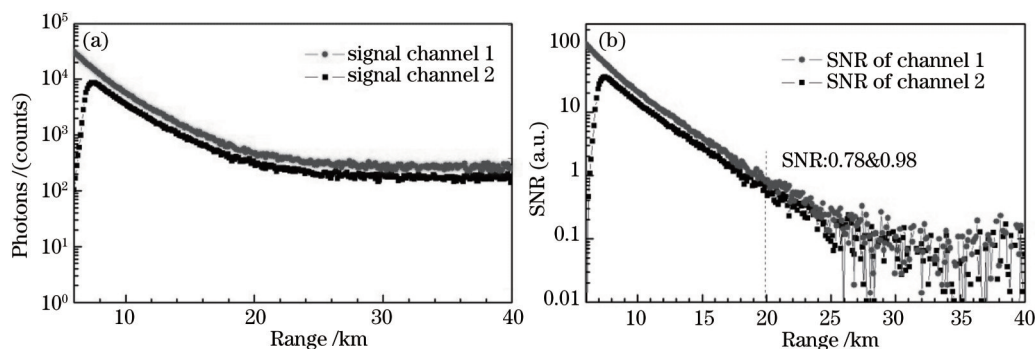


图8 (a)后向散射信号光强; (b) 信号通道信噪比

Fig.8 (a) Backscatter signal intensity; (b) SNR of signal channel

由图8可知,在20 km高度处的信噪比相比图5要小60%,即两个信号通道获得的能量差异越大,系统的信噪比越低。

3) 两个边缘通道使用的探测元件响应时间不一致,没有同步、及时反应信号的强度,致使信号通道信噪比降低、偏差增大。对比图5、图8数据的初始点可以看出,两个信号通道对光子信息的响应时间是不同步的,对应的信噪比产生差异。

DWL系统在外场实验中,通过不断的理论分析与数据处理,形成了成熟的外场实验技术,以保证系统能够长时间稳定工作,提供精确的大气风场数据,如图4(d)组风廓线数据,与探空气球的风速偏差在1.4 m/s以内、风向偏差在2.2°以内。

4 结 论

中高层大气风场是大气科学研究中的重点问题之一,其间有复杂的动力辐射耦合和大气质量与成分的交流,对临近空间飞行器的活动具有重要影响;DWL系统具有探测时间分辨率和空间分辨率比较高的优势,是中高层大气风场探测的有效手段之一,系统能否长期稳定地对大气风场进行探测、提供有效的风场数据是DWL课题组亟待解决的问题;通过对外场实验数据进行对比分析,得知:除系统本身参数以外,背景光强度、探测器的工作状态、发射激光的锁频状态、种子激光器的工作环境、转场或温度骤变对接收机引起的形变等是影响DWL探测精度的因素。

参 考 文 献

- 1 Lü Daren, Bian Jianchun, Chen Hongbin, *et al.*. Frontiers and significance of research on stratospheric processes[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(3): 221~228.
- 2 吕达仁, 卞建春, 陈洪滨, 等. 平流层大气过程研究的前沿与重要性[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(3): 221~228.
- 3 Tong Zhipeng, Cao Huangqiang, Wang Xiaojun. Development of SPIS following scientific development principle[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2007, 18(1): 1-5.
- 4 童志鹏, 曹黄强, 王晓钧. 以科学发展观统领平流层平台信息系统的发展[J]. *装备指挥技术学院学报*, 2007, 18(1): 1-5.
- 5 Zhou Xinjia, Chen Hongbin, Bian Jianchun. Analysis of the characteristics of zonal wind reverse layer in the lower and middle stratosphere of the northern hemisphere and its seasonal variation[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2011, 16(5): 565-576.
- 6 周昕家, 陈洪滨, 卞建春. 北半球平流层中低层纬向风季节转换及转换层特征的分析研究[J]. *气候与环境研究*, 2011, 16(5): 565-576.
- 7 Tu Jiangmin. Causes and countermeasures of lost ball balloon detected by L radar[J]. *Zhejiang Meteorological*, 2011, 32(1): 39-40.
- 8 屠江敏. L波段雷达探测气球丢球的原因及对策[J]. *浙江气象*, 2011, 32(1): 39-40.
- 9 T Kobayashi, M Imaki. Direct-detection Doppler lidar for high spatial-resolution profiling of wind field in the troposphere[J]. *CLEO*, 2003.
- 10 T Schroder, C Lemmerz, O Reitebuch, *et al.*. Frequency jitter and spectral width of an injection-seeded Q-switched Nd:YAG laser for a

- Doppler wind lidar[J]. Appl Phys B, 2007, 87(3): 437-444.
- 7 B M Gentry, H Chen. Tropospheric wind measurements obtained with the goddard Lidar observatory for winds (GLOW): Validation and performance[J]. Proc SPIE, 2002, 4484: 74-81.
- 8 G Baumgarten. Doppler Rayleigh/Mie/Raman lidar for wind and temperature measurements in the middle atmosphere up to 80km[J]. Atmos Meas Tech, 2010, 3: 1509-1518.
- 9 Lei Tang, Zhifeng Shu, Jihui Dong, *et al.*. Mobile Rayleigh Doppler wind lidar based on double-edge technique[J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(8): 726-731.
- 10 H Xia, X Dou, D Sun, *et al.*. Mid-altitude wind measurements with mobile Rayleigh Doppler lidar incorporating system-level optical frequency control method[J]. Opt Express, 2012, 14(20): 15286-15300.
- 11 Z Liu, B Liu, S Wu, *et al.*. High spatial and temporal resolution mobile incoherent Doppler lidar for sea surface wind measurements[J]. Opt Lett, 2008, 33(13): 1485-1487.
- 12 Gao Xin, Han Yuli, Jin Ge. Data acquisition system for wind lidar in the upper atmosphere[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0113002.
高 昕, 韩於利, 金 革. 中高层大气测风激光雷达数据采集系统[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0113002.
- 13 Shen Fahua, Xia Yiqi, Shi Aiai, *et al.*. Research on dual-frequency Doppler lidar based on Fabry-Perot etalon quad-edge technique[J]. Acta Optical Sinica, 2014, 34(10): 1001002.
沈法华, 夏益祺, 於爱爱, 等. 基于法布里-珀罗标准具四边缘技术的双频率多普勒激光雷达研究[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1001002.
- 14 J Mao, C Cai. Observation study of aerosol radiative properitied over China[J]. Acta Meteorological Sinica, 2006, 20(3): 306-321.
- 15 Fahua Shen, Hyunki Cha, Jihui Dong, *et al.*. Design and performance simulation of a molecular Doppler wind lidar[J]. Chin Opt Lett, 2009, 7(7): 593-597.
- 16 Zhao Hujia. Analyses of the Aerosol Optical Properties and Direct Radiative Forcing over a Group of Urban and Industrial Region in Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2014.
赵胡笏. 中国东北城市地区大气气溶胶光学特性及其直接辐射效应研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2014.

栏目编辑: 苏 岑